

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



TESIS

**Tratamiento de aguas ácidas para la obtención de agua tipo
III en la Sociedad Minera El Brocal S.A.A. – Tinyahuarco -
Pasco – 2019**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autor: Bach. Arturo Cristhian ANDAMAYO VITOR

Asesor: Dr. Sc. Hildebrando Anival CÓNDOR GARCÍA

Cerro de Pasco – Perú – 2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



TESIS

**Tratamiento de aguas ácidas para la obtención de agua tipo
III en la Sociedad Minera El Brocal S.A.A. – Tinyahuarco -
Pasco – 2019**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Mg. José Elí CASTILLO MONTALVÁN
PRESIDENTE

Mg. Cayo PALACIOS ESPÍRITU
MIEMBRO

Mg. Ramiro SIUCE BONIFACIO
MIEMBRO

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por guiarme en el camino del bien en cada momento de mi vida, por haberme dado una maravillosa familia que han sido mi mejor inspiración para sobresalir adelante y lograr mis objetivos.

A mis padres, por darme la vida y por hacer de mí, un varón con principios y valores, por brindarme su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida ya sea en los malos y buenos momentos.

RECONOCIMIENTO

Mediante el presente expreso mis sinceros reconocimientos a:

- A los docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Metalúrgica por la orientación y apoyo recibido durante el desarrollo académico de mi persona. En especial al asesor de la presente investigación quien me brindo toda su confianza y sugerencias para que esto se haga realidad.
- Al personal Staff y a los trabajadores de la Sociedad Minera El Brocal, por darme la oportunidad de realizar la presente investigación.

RESUMEN

Respecto de la gestión del agua, ha continuado buscando reducir el consumo de agua fresca en los diferentes procesos, habiéndose alcanzado un 88% en su recirculación. En la gestión de títulos habilitantes en recursos hídricos, se gestionó a favor de la Municipalidad Fundición Tinyahuarco la regularización del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (lagunas de oxidación) que se sigue ante el Ministerio de Vivienda, así como la autorización de vertimiento doméstico que se viene gestionando ante la Autoridad Nacional del Agua. Se ha seguido fortaleciendo la intervención en los monitoreos participativos junto a autoridades locales y comunales. En ese sentido, se desarrollaron dos actividades de monitoreo participativo (época seca y época húmeda) que contemplaron acciones de capacitación, muestreo y difusión de resultados, llegando a capacitarse a 15 líderes comunales. Este trabajo ha posibilitado desarrollar mayor confianza de parte de las poblaciones vecinas, además de haber permitido fortalecer capacidades locales que contribuyan a la corresponsabilidad ambiental. Por otro lado, El Brocal fue designado como representante de los usuarios no agrarios (industriales, mineros, energéticos y piscícolas) por la región Pasco ante el Consejo Interregional de Recursos Hídricos de la Cuenca del Mantaro, órgano de la Autoridad Nacional del Agua, que tiene como finalidad la planificación, coordinación y concertación para el aprovechamiento de los recursos hídricos de la cuenca. Por otro lado, con respecto de los monitoreos de calidad ambiental, se cumplió con el programa establecido para el año 2018, no habiéndose detectado incumplimientos a la norma de los vertimientos. La gestión de residuos sólidos se desarrolló siguiendo buenas prácticas para la recolección, segregación, reúso y reciclaje, alcanzándose en esta última niveles del 64%. Estas actividades fueron reforzadas a través de diversas capacitaciones, buscando reducir la

generación de residuos y mejorar el manejo en las instalaciones, puntos de acopio y en el proceso de generación de compost para la producción de abono que aprovechara los residuos orgánicos. Nuestra gestión ambiental incorpora mecanismos de seguimiento al cumplimiento de los diversos compromisos asumidos, habiéndose alcanzado un 96% de avance. En relación al soporte a la operación, se ha impulsado fuertemente la optimización de nuestros procesos actuales a través de la gestión del 4^{to} Informe Técnico Sustentatorio (ITS), el mismo que fuera aprobado por las autoridades correspondientes en el mes de mayo. Por otro lado, el Plan Integral de Adecuación a los ECA y LMP, presentado dentro de los plazos requeridos en fecha 13/03/2017, aún se encuentra en evaluación en la DGAAM del Ministerio de Energía y Minas. Asimismo, se ha iniciado un nuevo proyecto, el cual será evaluado por el SENACE, para modificar el Estudio de Impacto Ambiental a 30000 TMSD, cuyo propósito es integrar todos los instrumentos ambientales existentes de la Unidad e incluir nuevos proyectos de crecimiento y optimización. La provisión para el Cierre de Minas y Pasivos Ambientales para el año 2019 es de US\$ 115,9 millones. Por otro lado, los desembolsos realizados durante 2018 fueron de US\$ 0,8 millones, que incluyeron programas de rehabilitación y revegetación, entre otros. Las contingencias ambientales al 31 de diciembre de 2018 alcanzaron los US\$ 1,8 millones, cifra superior a las contingencias provisionadas al 31 de diciembre de 2017, la cual alcanzó la suma de US\$ 0,7 millones. Esta variación ha sido básicamente por trabajos pendientes de realización en los pasivos de Santa Bárbara, los que estaremos atendiendo en 2019.

Palabras claves: aguas ácidas, agua tipo III

ABSTRACT

Regarding water management, it has continued to seek to reduce the consumption of fresh water in the different processes, having reached 88% in its recirculation. In the management of qualifying titles in water resources, the regularization of the Domestic Waste Water Treatment System (oxidation lagoons) that is followed before the Ministry of Housing, as well as the authorization of domestic dumping, was managed in favor of the Municipality of Tinyahuarco Foundry, which is being managed before the National Water Authority. The intervention in participatory monitoring has continued to be strengthened together with local and community authorities. In that sense, two participatory monitoring activities were developed (dry season and wet season) that contemplated training, sampling and dissemination of results, reaching 15 community leaders. This work has made it possible to develop greater confidence on the part of neighboring populations, in addition to having allowed strengthening local capacities that contribute to environmental co-responsibility. On the other hand, El Brocal was designated as a representative of non-agricultural users (industrial, mining, energy and fish) by the Pasco region before the interregional Council of Water Resources of the Mantaro Basin, an organ of the National Water Authority, which Its purpose is the planning, coordination and consultation for the use of water resources in the basin. On the other hand, with respect to environmental quality monitoring,

The program established for the year 2018 was fulfilled, and no breaches of the dumping norm were detected. Solid waste management was developed following good practices for collection, segregation, reuse and recycling, reaching the latter levels of 64%. These activities were reinforced through various trainings, seeking to reduce the generation of

waste and improve the management of facilities, collection points and the process of generating compost for the production of fertilizer that will take advantage of organic waste. Our environmental management incorporates mechanisms for monitoring compliance with the various commitments assumed, having achieved a 96% progress. In relation to the support to the operation, the optimization of our current processes has been strongly promoted through the management of the 4th Sustainable Technical Report (ITS), which was approved by the corresponding authorities in the month of May. On the other hand, the Comprehensive Plan for Adaptation to the ECA and LMP, presented within the deadlines required on 03/13/2017, is still under evaluation in the DGAAM of the Ministry of Energy and Mines. Likewise, a new project has been initiated, which will be evaluated by SENACE, to modify the Environmental Impact Study to 30 000 TMSD, whose purpose is to integrate all the existing environmental instruments of the Unit and include new growth and optimization projects. The provision for the Closure of Mines and Environmental Liabilities for the year 2019 is US \$ 115.9 million. On the other hand, disbursements made during 2018 were US \$ 0.8 million, which included rehabilitation and revegetation programs, among others. The environmental contingencies provisioned as of December 31, 2018 reached US \$ 1.8 million, higher than the contingencies provisioned as of December 31, 2017, which reached the sum of US \$ 0.7 million. This variation has basically been due to work pending in the liabilities of Santa Barbara, which we will attend in 2019.

Keywords: acidic water, type III water.

INTRODUCCIÓN

Los drenajes ácidos de roca y de explotaciones de mineras son las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Debido a que este problema puede persistir durante décadas e incluso cientos de años una vez finalizado el ciclo productivo, existe la necesidad de aplicar tecnologías basadas en sistemas de tratamiento pasivo de probada eficacia y de bajo costo de operación y mantenimiento respecto a los procesos de tratamiento activo.

Los drenajes ácidos de mina contienen un alto contenido en sulfato y metales disueltos (Hierro, Aluminio, Manganeso, Zinc, Cobre, Plomo, etc.), alcanzando sus concentraciones en decenas de miligramos por litro. Éstos elementos en esas concentraciones son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cauces de ríos y riachuelos que en muchos de los casos estas aguas sirven para la agricultura en forma de riego.

Debido al enorme costo que es su tratamiento en depuradoras convencionales, y que perdura el fenómeno de generación de aguas ácidas, se presenta una alternativa a las plantas de tratamiento convencional que son los métodos de tratamiento pasivo debido a su bajo costo de construcción, fácil operación y mantenimiento, y buena eficiencia.

Estos métodos de tratamiento pasivo son sistemas bio-geoquímicos que interceptan el flujo de agua ácida y mejoran la calidad del agua. Los más utilizados, hoy, son los humedales artificiales (aerobios o anaerobios), los drenajes anóxicos calizos, los sistemas de producción de alcalinidad.

El objetivo principal en todos ellos es la supresión de la acidez y la precipitación de los metales. Para ello actúan cambiando las condiciones de Eh y pH del influente de forma que se favorezca la formación de especies insolubles que precipiten y retengan la carga contaminante.

Por lo general, en los sistemas pasivos se recurre al uso de material alcalino para neutralizar la acidez, a substratos orgánicos para crear ambientes reductores y al empleo de bacterias para catalizar las reacciones. En el diseño y la configuración del tratamiento se debe asegurar una buena circulación y distribución del influente dentro del sistema, con el fin de maximizar el tiempo de contacto entre el flujo de agua contaminada con los elementos y materiales que componen cada dispositivo de tratamiento.

Para expresar la intención de la investigación manifiesto lo siguiente:

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN, donde se ha considerado la identificación Y determinación del problema, formulación del problema, formulación de los objetivos, la justificación y limitaciones de la investigación.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO, donde se ha considerado los antecedentes de la investigación, estudio de la de la Sociedad Minera El Brocal, bases teóricas científicas definición de términos básicos, formulación de hipótesis, identificación de variables y la definición operacional de variables.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN, se da a conocer el tipo de investigación, métodos de investigación, diseño de investigación,

población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos, técnicas de procesamiento y análisis de datos y la orientación ética.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN, en este capítulo se ha considerado la presentación, análisis e interpretación de resultados y la prueba de hipótesis.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, se han desarrollado principalmente las conclusiones del estudio de investigación y dar sugerencias para continuar con la investigación.

ÍNDICE

DEDICATORIA

RECONOCIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1. IDENTIFICACION Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.3.1. Problema general	6
1.3.2. Problemas específicos	6
1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	7
1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO	9
------------------------------	---

2.2. BASES TEÓRICAS CIENTÍFICAS	13
2.2.1. Drenaje ácido de roca	13
2.2.2. Generación de aguas ácidas	15
2.2.3. Neutralización de aguas ácidas	16
2.2.4. Tratamiento positivo de drenajes ácidos	19
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	20
2.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	28
2.4.1. Hipótesis General	28
2.4.2. Hipótesis específicas	28
2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	28
2.5.1. Variable Dependiente	28
2.5.2. Variable Independiente	28
2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES	29
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	30
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	30
3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	31
3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	32
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	32
3.4.1. Población	32
3.4.2. Muestra	32
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DD DATOS	32
3.5.1. Instalación de los tanques para cementación de partículas y carbón activado	32

3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	35
3.6.1. Ubicación de la planta piloto de tratamiento de aguas ácidas	35
3.6.2. Nueva plataforma	36
3.6.3. Materiales	37
3.6.4. Presentación, análisis e interpretación de los datos	37
3.6.5. Evolución del potencial Redox (Eh)	38
3.6.6. Evolución de la concentración del hierro (Fe)	40
3.6.7. Evolución alcalina (CaCO ₃ /l)	41
3.6.8. Evolución de la concentración del cobre (Cu)	41
3.6.9. Evolución de la concentración del calcio (Ca)	43
3.6.10. Evolución de sólidos totales en suspensión	44
3.6.11. Evolución de los sólidos totales en suspensión	45
3.7. ORIENTACIÓN ÉTICA	45
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO	47
4.1.1. Marco contextual	47
4.1.2. Límites máximos permisibles	51
4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	51
4.2.1. Resultados obtenidos de las pruebas en la planta piloto	52
4.2.2. Balance del circuito de adsorción de la planta piloto	58
4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS	63

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Haremos una descripción de los problemas existentes en la Sociedad Minera El Brocal S.A.A., donde la explotación de los minerales polimetálicos afecta el medio ambiente al emitir aguas ácidas desde la interior mina y el procesamiento de estos minerales en la planta concentradora, llevándose las aguas a ser tratadas.

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

El Drenaje Ácido de la Minería (DAM) es el mayor problema ambiental provocado por la industria minera y es también su mayor pasivo, especialmente para nuestras corrientes de agua. Una mina generadora de ácido tiene el potencial para causar un impacto devastador a largo plazo en los ríos, arroyos y vida acuática, volviéndose en efecto, una "máquina de contaminación perpetua".

Existen cuatro tipos importantes de impactos mineros en cuanto a calidad de agua:

- Drenaje ácido de la minería (DAM).- Cuando las grandes cantidades de roca que contienen minerales sulfatados, son excavadas en tajo abierto o en vetas en minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua para crear ácido sulfúrico. Cuando el agua alcanza cierto nivel de acidez, un tipo de bacteria común llamada "Tiobacilus Ferroxidante", puede aparecer acelerando los procesos de oxidación y acidificación, lixiviando aún más los residuos de metales de desecho. El ácido lixiviara la roca mientras que la roca fuente este expuesta al aire y al agua. Este proceso continuara hasta que los sulfatos sean extraídos completamente; este es un proceso que puede durar cientos, o quizás miles de años. El ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales, y posteriormente depositado en los estanques de agua, arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos. El DAM degrada severamente la calidad del agua y puede aniquilar la vida acuática, así como volver el agua prácticamente inservible.
- Metales pesados y lixiviación.- La contaminación por metales pesados es causada cuando algunos metales como el arsénico, el cobalto, el cobre, el cadmio, el plomo, el oro, la plata y el zinc, contenidos en las rocas excavadas o expuestos en vetas en una mina subterránea, entran en contacto con el agua. Los metales son extraídos y llevados río abajo, mientras el agua lava la superficie rocosa. Aunque los metales pueden ser movidos en condiciones de pH neutral, la lixiviación es particularmente acelerada en condiciones de pH bajo, tales como las creadas por el drenaje ácido de la minería.

- Contaminación química.- Este tipo de contaminación ocurre cuando algunos agentes químicos (tales como el cianuro y el ácido sulfúrico, utilizados por compañías mineras para la separación del material deseado, del mineral en bruto) se derraman, gotean, o se trasladan del sitio minero a un cuerpo de agua cercano. Estos químicos pueden ser también altamente tóxicos para los humanos y la fauna.
- Erosión y sedimentación.- El desarrollo minero perturba el suelo y las rocas en el transcurso de la construcción y mantenimiento de caminos, basureros y excavaciones a la intemperie. Por la ausencia de prevenciones adecuadas y estrategias de control, la erosión de la tierra expuesta puede transportar una gran cantidad de sedimentación a arroyos, ríos y lagos. La sedimentación excesiva puede obstruir riveras, la delicada vegetación de estas y el hábitat para la fauna y organismos acuáticos.
- Las escombreras.- Una vez que los minerales han sido procesados y recuperados, la roca sobrante se vuelve otra forma de desperdicio minero que se ubican en las escombreras. Las escombreras contienen los mismos metales pesados tóxicos y formaciones de ácido mineral que produce el desecho de roca. También pueden contener agentes químicos usados para el procesamiento del mineral en bruto, tales como cianuro o ácido sulfúrico. Las escombreras son usualmente colocadas en la superficie, en áreas de contención o en lagunas de oxidación, y en un número creciente de operaciones bajo tierra, donde el desecho es usado como relleno para las áreas que fueron excavadas. Si son asegurados inapropiadamente, los contaminantes de los desechos mineros

pueden lixiviar hacia la superficie o a los mantos de agua subterránea causando una contaminación seria que puede perdurar durante muchas generaciones.

1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Las aguas ácidas de minería se originan mediante la oxidación química y biológica de la pirita. Este fenómeno se produce cuando las rocas conteniendo dichos sulfuros entran en contacto con aire o agua. A esto hay que añadir que un agua ácida procedente de rocas y minerales incluye también numerosos metales en disolución, que aportan una importante toxicidad al efluente. Así pues, los drenajes ácidos que se producen en las minas subterráneas y a cielo abierto son una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas que se encuentran en su entorno. Para evitar este daño medio ambiental se deben tomar medidas, tanto preventivas (o pasivas) como activas mediante la implantación de métodos de tratamiento de estos efluentes ácidos. Por lo que se refiere a las tecnologías de tratamiento cabe aclarar que en numerosas ocasiones no es suficiente con un único procedimiento, sino que se hace necesaria la combinación de varios. Todo dependerá de cada caso y sus múltiples variables. Esto se desarrolla en la Sociedad Minera El Brocal, distrito de Tinyahuarco, Provincia y Región Pasco.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los sulfuros presentes en las rocas mineralógicas expuestas al medio ambiente tienen como consecuencia la formación de drenajes ácidos de mina caracterizado

por sus bajos valores de pH y elevadas concentraciones de iones inorgánicos tóxicos, siendo ampliamente reconocida como uno de los grandes problemas ambientales en muchas regiones mineras de todo nuestro país como, por ejemplo: Cajamarca, La Libertad, Áncash, Junín, Pasco, Huancavelica, Arequipa y Moquegua. La necesidad de prevenir y controlar la formación de drenajes ácidos de mina (DAM) ha provocado el desarrollo de tratamientos que en la actualidad son conocidos como tratamientos activos y pasivos. En nuestro país el tratamiento más utilizado son los convencionales para la neutralización y precipitación de metales de los drenajes ácidos.

Las aguas ácidas son consideradas como un fenómeno que puede presentarse de forma natural en cualquier yacimiento pórfido cuprífero. Estas aguas se producen a través de la oxidación química y biológica de sulfuros metálicos como piritita o pirrotita que generalmente se encuentran en escombreras, relaves, aguas interior mina, entre otros. Cuando las aguas ácidas no son controladas ni gestionadas a tiempo ni de forma adecuada, estas se vuelven una gran amenaza para el medio en el que vivimos, sobre todo para los sistemas acuáticos. Además,

- El agua afectada se vuelve fuertemente corrosiva.
- A medida que la solubilidad de los metales pesados aumenta, las aguas llegan a ser más tóxicas.
- La presencia de las aguas ácidas genera un daño irreparable a los sistemas acuáticos.
- Afectan la calidad de las aguas subterráneas, superficiales y acuíferos.
- Las comunidades locales también se ven perjudicadas, ya que no podrían utilizar el agua para ningún tipo de actividad.

- El ecosistema fluvial se va degradando, hasta que no se puedan mantener ninguna forma de vida acuática.

1.3.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cómo realizar el tratamiento de aguas ácidas para la obtención de agua tipo III en la Sociedad Minera El Brocal?

1.3.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

1. ¿Cómo podemos captar los metales disueltos que contiene el agua que está siendo tratada para obtener agua tipo III?
2. ¿Qué parámetros podemos controlar en el flujo que se envía las columnas de carbón activado para la obtención de agua tipo III?
3. ¿Cómo hacer la evaluación antes y después de la columna de carbón activado para la obtención de agua tipo III?

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el tratamiento de aguas ácidas para obtener agua tipo III en la Sociedad Minera El Brocal.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Captar metales disueltos que contiene el agua que está siendo tratada para obtener agua tipo III.
2. Obtener parámetros de control de flujo que se envía las columnas de carbón activado para obtener agua tipo III.
3. Evaluar el alimento y descarga de cada columna de carbón activado para obtener agua tipo III.

1.5. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La presente investigación está enmarcada en el tratamiento de las aguas ácidas en la Sociedad Minera El Brocal, para emitir aguas tipo III, que es un agua tratada para la agricultura. Es una investigación de índole tecnológica y preservando el medio ambiente. En su factibilidad económica podremos decir que sí es posible llevar a cabo este tratamiento toda vez que está en recesión los precios de los metales en el mundo.

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio de investigación nos ayuda a identificar lo peligroso que son las aguas ácidas para la vida (humano, vegetal, animal), y plantear posibles soluciones mediante un tratamiento en la Sociedad Minera El Brocal, de esa manera

tener agua amigable al medio ambiente es decir que se pueda utilizar sin ningún temor.

La investigación a realizarse tendrá como tema principal el tratamiento de aguas ácidas emitidas por las labores mineras en la Sociedad Minera El Brocal y para ello se tiene como limitaciones las instalaciones y realizar a nivel de laboratorio donde no se tiene ningún equipo o materiales para este propósito y teniendo en cuenta que la bibliografía es escasa en el mundo de la minería, así como también se llevará a cabo en un lapso de 6 meses de estudio.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente estudio de investigación se desarrollará el tratamiento de las aguas ácidas emanadas por las labores mineras en la Sociedad Minera El Brocal.

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS CON ROCA CALCAREA

Un estudio referente a tratamiento pasivo de aguas ácidas utilizando roca travertina no existe, pero si existe bibliografía referente a tratamiento de aguas ácidas con roca caliza, del cual daremos cuenta.

En las dos últimas décadas se han investigado diversos métodos de tratamiento pasivo y se ha comprobado que dan buenos rendimientos en la neutralización del pH y en la eliminación de metales pesados. Además, requieren poco mantenimiento

y su bajo coste puede ser asumido durante largos períodos de tiempo (de 20 a 40 años) una vez clausurada la instalación minera (Watzlaf, 1997b)¹.

Los métodos de tratamiento pasivo se basan en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales (wetlands), en donde se modifican favorablemente ciertas características de las aguas contaminadas, consiguiendo la eliminación de metales y la neutralización del pH.

Entre 1987 y 1990 la Colorado School of Mines realiza unos estudios teóricos para el diseño de humedales dedicados a la eliminación de metales de aguas ácidas de mina. Una vez concluido este proyecto se publica un manual: *Handbook for Constructed Wetlands Receiving Acid Mine Drainage* (Wildeman et al., 1993), en el que se describen numerosos casos de laboratorio y de campo, la filosofía de funcionamientos alcanzados en el tratamiento de aguas ácidas con elevados contenidos metálicos.

En Canadá también se vienen aplicando sistemas pasivos en el tratamiento de drenajes ácidos. Entre 1990 y 1993 se construyeron dos humedales anaerobios experimentales para tratar las aguas ácidas de la mina de cobre *Bell Copper* (British Columbia). En los dos sistemas se incrementó el pH desde 3 hasta 6-8 y se lograron reducciones del 40 % y del 80 % de Cu con un tiempo de retención de 12 y 23 días, respectivamente. El rendimiento mejoraba al incrementarse el tiempo de retención y disminuía al descender la temperatura como reflejo de una menor actividad biológica (Sobolewski, 1996)².

¹ Watzlaf, G. (1997b) Passive treatment acid mine drainage in dow-flow limestone systems. U.S. Department of Energy Technology Center, Pittsburgh.

² Sobolewski, A. (1996), Metal species indicate the potential of constructed wetlands for long-term treatment of mine drainage. *Ecological Engineering*.

También en España en los últimos años se vienen realizando ensayos con este tipo de tratamientos. Así, para tratar el agua de mina que empezó a surgir en 1995 por una galería de acceso de la mina Troya, cerrada antes de lo previsto en 1993, se viene utilizando la balsa de decantación de estériles a modo de humedal aeróbico. Las aguas de mina se conducen mediante un canal a la antigua balsa de decantación, aún con capacidad por el cierre prematuro, donde los metales disueltos se oxidan e hidrolizan, precipitando como oxihidróxidos en el pH neutro de esta agua (Iribar et al., 1999)³. En la Universidad de Oviedo se experimentó a escala de laboratorio con un sistema combinado de RAPS y un humedal con caliza, compost y plantas (*Tipha latifolia*), en el que se lograron reducciones de cerca del 65 % para la acidez, 100 % de Al 27 % de Mn y 99,5 % de Fe. El RAPS (Reducing And Alkalinity-Producing Systems) fue ineficaz en la retención del sulfato obteniéndose un 32 % exclusivamente en el humedal. El pH a través de este sistema se incrementó de 3 a 7 (Ordóñez et al., 1999)⁴.

En los humedales anaerobios, para favorecer las condiciones anóxicas que se requieren para su correcto funcionamiento, la altura de la lámina de agua ha de superar los 30 cm. Esta lámina cubre un substrato permeable de un espesor de 30-60 cm formado mayoritariamente por material orgánico (70-90 % de estiércol, compost, turba, heno, serrín, etc.), que está entremezclado o bien dispuesto sobre una capa de caliza. La finalidad del substrato orgánico es eliminar el oxígeno disuelto, reducir el Fe^{3+} a Fe^{2+} , y generar alcalinidad mediante procesos químicos

³ Iribar, V., Izco, F., Tames, P., Da Silva, A. y Antigüedad, I. (1999), Use a tailings pond as an aerobic wetland at the closed Troya mine (Guipúzcoa, Northern Spain). IMWA Congress, *Mine, Water & Environment*, Sevilla.

⁴ Ordóñez, A., Loredó, J. y Pendás, F. (1999), A successive alkalinity producing system (RAPS) as operational unit in a hybrid passive treatment system for acid mine drainage. IMWA Congress, *Mine, Water & Environment*, Sevilla.

o con intervención de microorganismos. Sobre el conjunto de este substrato se desarrolla la vegetación emergente característica de los humedales, la cual ayuda a estabilizar el substrato además de aportar materia orgánica adicional. Estos sistemas operan en permanente inundación, fluyendo parte del agua horizontalmente a través del substrato orgánico. En éste, se desarrollan bacterias anaerobias sulfo-reductoras (*Desulfovibrio* y *Desulfomaculum*) capaces de utilizar su reacción con la materia orgánica del substrato (CH_2O) y el sulfato disuelto en el agua intersticial como fuente de energía para su metabolismo. Esta reducción bacteriana del sulfato genera ácido sulfhídrico, o azufre elemental, y alcalinidad mediante reacciones (donde CH_2O es la representación genérica de la materia orgánica) (Skousen et al., 1998)⁵.

El ambiente reductor que impera en el substrato mantiene el hierro en su estado reducido (Fe^{2+}), impidiendo de este modo la formación de hidróxido férrico, muy insoluble al pH neutro alcanzado, evitando la pérdida del rendimiento de la caliza, como fuente generadora de alcalinidad, al no verse recubierta por este precipitado. El Fe^{2+} y otros cationes metálicos pueden ser inmovilizados como sulfuros en el ambiente reductor del substrato orgánico.

Los humedales anaerobios al generar alcalinidad admiten drenajes de mina con un $\text{pH} < 4$, y el ambiente reductor que impera en el substrato hace admisibles influentes con oxígeno disuelto ($> 5 \text{ mg/l}$), Fe^{3+} y Al^{3+} (Hedin y Nairn, 1993)⁶.

⁵ Ordóñez, A., Loredo, J. y Pendás, F. (1999), A successive alkalinity producing system (RAPS) as operational unit in a hybrid passive treatment system for acid mine drainage. IMWA Congress, *Mine, Water & Environment*, Sevilla.

⁶ Hedin, R. S., and Nairn, R. W. (1993), Contaminant removal capabilities of wetlands constructed to treat coal mine drainage. En: G. A. Moshiri (ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, CRC Press, Boca Raton.

2.2. BASES TEÓRICAS CIENTÍFICAS

2.2.1. DRENAJE ÁCIDO DE ROCA

El fenómeno de drenaje ácido proveniente de minerales sulfurosos es un proceso que ocurre en forma natural. Hace cientos de años, se descubrieron muchos yacimientos minerales por la presencia de agua de drenaje rojiza, indicando la presencia de minerales sulfurosos.

Hace sólo alrededor de 20 años, se desarrolló una preocupación ambiental asociada con esta agua ácida, rica en metales disueltos, así como el término "drenaje ácido de mina" o DAM. No obstante, el drenaje ácido no ocurre únicamente en las minas, por lo que el término "drenaje ácido de roca" o DAR también es usado comúnmente. Cualquiera sea el término empleado -DAM o DAR- el drenaje ácido se refiere a: drenaje contaminado que resulta de la oxidación de minerales sulfurados y lixiviación de metales asociados, provenientes de las rocas sulfurosas cuando son expuestas al aire y al agua. El desarrollo del DAR es un proceso dependiente del tiempo y que involucra procesos de oxidación tanto química como biológica y fenómenos físico-químicos asociados, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento⁷.

Es importante reconocer que la definición se refiere al drenaje contaminado. El desarrollo del clásico DAR de pH bajo y rico en metales es un proceso que depende del tiempo. A lo largo del tiempo, la química del agua de drenaje cambiará, volviéndose gradualmente más ácida, con concentraciones

⁷ Summers L Bonelli J. (1997). Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas, Lima, Perú.

crecientes de metales. Sin embargo, como se describe en la definición, el DAR se refiere a todo drenaje contaminado como resultado de los procesos de oxidación y lixiviación de los minerales sulfurosos. Con el tiempo las características del drenaje pueden cambiar, de ligeramente alcalino hasta casi neutro y finalmente ácido.

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

Generalmente el DAR se caracteriza por:

- Valores de pH por debajo de 7 hasta 1,5
- Alcalinidad decreciente y acidez creciente
- Concentraciones elevadas de sulfato
- Concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales)
- Concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales

Con respecto al drenaje ácido de mina en el Perú, la preocupación fundamental sería los niveles elevados de acidez, sulfato, niveles de hierro y cobre y la lixiviación de otros metales asociados con el mineral sulfuroso.

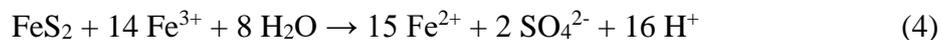
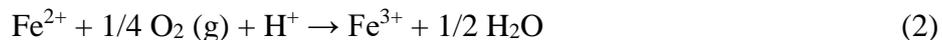
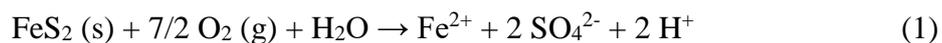
La preocupación ambiental con respecto al DAR, generalmente, es el impacto adverso de los contaminantes, particularmente los metales disueltos, en la vida acuática del medio receptor y en la calidad del agua para beber⁸.

⁸ Summers L Bonelli J. (1997). Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas, Lima, Perú.

2.2.2. GENERACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS

Los componentes principales para la generación de ácido son: minerales sulfurosos reactivos; agua o atmósfera húmeda; y un oxidante, especialmente el oxígeno de la atmósfera o de fuentes químicas.

El proceso de oxidación de la pirita es el principal responsable de la formación de aguas ácidas; esta oxidación se ve favorecida en áreas mineras debido a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros —a través de las labores mineras de acceso y por los poros existentes en las pilas de estériles y residuos— así como al incremento de la superficie de contacto de las partículas. Dichos autores consideran que los factores que más afectan a la generación ácida son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución espacial de la pirita. Las reacciones que intervienen en la oxidación de la pirita pueden ser representadas por las siguientes cuatro ecuaciones⁹:



En la reacción de oxidación de la pirita (1) se produce



⁹ Nordstrom D.K. and Alpers C.N. (1999), Geochemistry of acid mine waters. En: Plumlee, G.S., Logsdon, M.J. (eds), *The environmental geochemistry of mineral deposits*. Reviews in Economic Geology, Society of Economic Geologists, Littleton, CO. USA.

Esta reacción provoca un incremento en el total de sólidos disueltos y un aumento de la acidez, que irá asociado a una disminución del pH. Si el ambiente circundante es lo suficientemente oxidante, entonces muchos iones ferrosos se oxidarán a iones férricos (etapa 2). Por lo general, por encima de un pH alrededor de 3,5; el ion férrico formado precipita mediante hidrólisis como hidróxido (3), disminuyendo por tanto el Fe^{3+} en solución, mientras que el pH baja simultáneamente. Por último, algunos cationes férricos (Fe^{3+}) que se mantienen en solución, pueden seguir oxidando adicionalmente a la pirita y formar Fe^{2+} , SO_4^{2-} y H^+ (4).

Cinéticamente, la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} es la reacción más lenta a pH ácido. A pH por encima de 4 la velocidad de la reacción aumenta drásticamente, casi todo el Fe está en forma de Fe^{3+} y precipita como hidróxido (3). A pH por debajo de 4, sin embargo, la mayoría del Fe en solución es Fe^{2+} , aunque la acción bacteriana (*Thiobacillus ferroxidans*) consigue acelerar el proceso y que progresivamente el Fe^{2+} pase a Fe^{3+} . Parte del Fe^{3+} se emplea en oxidar más pirita (4) y parte precipita como hidroxisulfatos (schwerimannita a pH entre 3 y 3,5; y jarosita a pH inferior a 3).

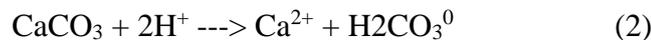
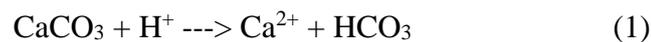
2.2.3. NEUTRALIZACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS

Después de la oxidación de un mineral sulfuroso, los productos ácidos resultantes pueden ser arrastrados por la infiltración de agua; o extraídos de la solución, como resultado de la reacción con un mineral que consuma ácido.

Existe una serie de minerales que pueden consumir acidez y neutralizar el drenaje ácido. Entre los minerales que consumen ácido se encuentran:

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

El mineral más común que consume ácido es la calcita (CaCO_3), que consume acidez a través de la formación de bicarbonato (HCO_3) o ácido carbónico (H_2CO_3^0):



La calcita es el mineral carbonatado más abundante de los yacimientos mineralizados en el Perú, asociado con muy escasa, o ninguna, dolomita.

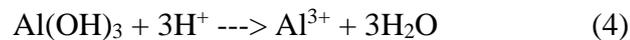
Generalmente, es el más reactivo de los minerales consumidores de ácido y, a diferencia de la mayoría de éstos, tiende a ser más soluble a temperaturas más bajas.

La liberación de bicarbonato y carbonato a través de la disolución de la calcita puede resultar en la formación de minerales carbonatados secundarios, siderita (FeCO_3), mediante:



Este mineral también puede estar presente como mineral principal en la roca. Es menos soluble que la calcita, tendiendo a amortiguar el pH en el rango de 4,5 a 6,0. La calcita tiende a neutralizar soluciones llevándolas hasta un pH entre 6,0 y 8,0.

Los siguientes minerales que proporcionan alcalinidad, luego del consumo de los minerales carbonatados, generalmente son los hidróxidos, los cuales consumen acidez mediante la formación de un ión libre más agua, como se muestra en la ecuación 4, por ejemplo, para $\text{Al}(\text{OH})_3$:



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

Las reacciones de neutralización eliminarán una porción de la acidez y el hierro de la solución, elevando el pH. Donde hay suficiente tiempo de contacto con los minerales consumidores de ácido, puede ocurrir la neutralización hacia un pH de 7. Bajo condiciones de pH neutro, la mayoría de metales presenta baja solubilidad y precipitan de la solución en forma de hidróxidos u óxidos metálicos. Sin embargo, algunos metales, como el zinc,

arsénico y molibdeno, son tan solubles -o más solubles- bajo condiciones alcalinas que bajo condiciones ácidas. Los iones de sulfato también son químicamente estables en un amplio rango de pH. En consecuencia, las concentraciones de sulfato algunas veces pueden servir como indicador general de la magnitud de la generación de ácido, incluso después de que la neutralización se ha producido. Una serie de minerales pueden aportar alcalinidad.

2.2.4. TRATAMIENTOS PASIVOS DE DRENAJES ÁCIDOS

Los métodos de tratamiento convencionales o activos de aguas ácidas tienen un coste elevado, por lo que no pueden ser mantenidos por un período prolongado una vez finalizada la vida de la mina. Máxime teniendo en cuenta que el problema de las aguas ácidas puede perdurar, según las estimaciones de Younger (1997), varios cientos de años. En la última década se han investigado diversos métodos de tratamiento pasivo y se ha comprobado que dan buenos rendimientos en la neutralización del pH y en la eliminación de metales pesados. Además, requieren poco mantenimiento y su bajo coste puede ser asumido durante largos períodos de tiempo (de 20 a 40 años) una vez clausurada la instalación minera¹⁰.

Los métodos de tratamiento pasivo se basan en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales (wetlands), en donde se modifican favorablemente ciertas características de

¹⁰ Watzlaf, G. (1997b) Passive treatment acid mine drainage in dow-flow limestone systems. U.S. Department of Energy Technology Center, Pittsburgh.

las aguas contaminadas, consiguiendo la eliminación de metales y la neutralización del pH.

Estos tratamientos ecológicos están constituidos por una serie de dispositivos de tratamiento tanto de base química como de base biológica, como: los humedales aerobios, los humedales anaerobios o balsas orgánicas, los drenajes anóxicos calizos (ALD, Anoxic Limestone Drains), los canales óxicos calizos (OLC, Open Limestone Drains), la adición de caliza en cauces (SLA, Stream Limestone Addition), las balsas o estanques calizos (LP, Limestone Ponds), los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems). Estos dispositivos se emplean solos o combinados, cuyo objetivo principal es la supresión de la acidez y la eliminación de sustancias contaminantes, para ello, se recurre al empleo de vegetación y bacterias para catalizar las reacciones y acelerar los procesos que forman precipitados (biotratamiento), así como el uso de material alcalino para neutralizar la acidez.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Para el presente estudio se han identificado términos relevantes para la investigación:

CALCITA.- La calcita (CaCO_3) es un mineral del grupo de los Carbonatos, A veces se usa como sinónimo caliza, aunque es incorrecto pues ésta es una roca más que un mineral. Su nombre viene del latín Calx, que significa cal viva. Es el mineral más estable que existe de carbonato de calcio.

Contiene el 56,03% de CaO y el 43,97% de CO₂.

CALIZA.- Tipo común de roca sedimentaria, ampliamente difundida, compuesta en su totalidad o en su mayor parte por calcita (carbonato de calcio, CaCO₃). Se caracteriza por la efervescencia, en frío, al contacto con un ácido. Se distinguen las calizas propiamente dichas y las rocas dolomíticas, que contienen una cantidad notable de carbonato doble de calcio y de magnesio.

Cuando se calcina (se lleva a alta temperatura) da lugar a cal (óxido de calcio, CaO).

TRAVERTINO.- El travertino utilizado para el tratamiento de las aguas ácidas provienen de las Canteras de la Compañía Minera TELSA SAC ubicada en el distrito de San José de Quero, provincia de Concepción, departamento de Junín.

Desde el punto de vista geológico el travertino proviene de un depósito del Terciario Superior conocido como tobas volcánicas travertinos de Ingahuasi (Ts-it) que son grandes re-deposiciones en ambientes lacustres y parte al aire libre.

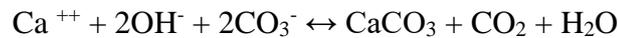
Desde el punto de vista de la génesis del yacimiento el travertino se formó a partir de las soluciones de ácido carbónico provenientes de las corrientes de aguas subterráneas que fluyeron a la superficie en un ambiente termal al entrar en contacto con el oxígeno precipitaron el CaCO₃ dando lugar a la formación de travertino.

Las rocas denominadas travertinos son consideradas como depósitos de fuentes de aguas calientes, formadas por deposición CaCO₃ por la presencia de una rica vegetación ávida de anhídrico carbónico que aceleró la precipitación del carbonato de calcio.

Es una roca sedimentaria carbonatada de precipitación química y/o bioquímica, de estructura muy oquerosa y poco densa, que puede presentar bandas con distinto

porcentaje de huecos y coloraciones. Puede contener fósiles de moluscos terrestres y acuáticos de agua dulce, así como impresiones de distintas partes de vegetales. En numerosas ocasiones poseen estructuras concrecionadas y tubiformes.

Los travertinos se originan por la precipitación del carbonato cálcico que existe disuelto en las aguas subterráneas (bicarbonato cálcico). Cuando éstas surgen a la superficie o atraviesan sedimentos donde la actividad de los vegetales retira CO₂ y/o aumenta la temperatura y disminuye la presión de las aguas, se genera el paso del bicarbonato a carbonato, que es insoluble. Por ello, los travertinos se suelen formar en las inmediaciones de afloramientos de aguas subterráneas. Como en estas zonas suele existir poblaciones más o menos importantes de plantas, el carbonato suele precipitar sobre ellas o sobre sus restos, conservando moldes o impresiones de los mismos.



El contenido de CaCO₃ y otras sustancias influyen en el color y el brillo de los travertinos, el porcentaje promedio de CaCO₃ de nuestra muestra es 97,67. Análisis químico del travertino de la Cantera de la Cia. Minera TELSA SAC:

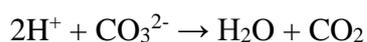
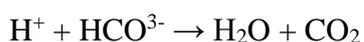
$$\text{CaO} = 54,73 \%, \text{CO}_2 = 42,95 \% \text{ y } \text{CaCO}_3 = 97,67 \%$$

pH.- El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio [H₃O⁺] presentes en determinadas sustancias.

La sigla significa "potencial de hidrógeno". El pH típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidas las disoluciones con pH menores a 7 y alcalinas las que tienen pH mayores a 7. El pH = 7 indica la neutralidad de la disolución (donde el disolvente es agua), también se define el pOH, que mide la concentración de iones OH⁻.

Eh.- Cuando se ponen en contacto dos elementos en solución, con presencia de su forma elemental y la forma ionizada correspondiente, siempre hay uno que se oxida y otro que se reduce, lo que se manifiesta por el incremento en una de sus formas. El elemento que se reduce es el que posee una capacidad oxidante mayor. La capacidad oxidante es lo que se conoce como potencial de oxidación (Eh), que cuanto más alto es, mayor es la capacidad oxidante del sistema y mayor es la concentración de la forma reducida. El potencial de oxidación se mide en voltios, aunque como su valor es muy pequeño se expresa usualmente en milivoltios (mV).

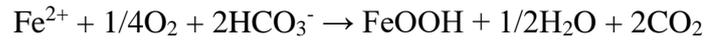
ALCALINIDAD.- Cuando el agua de mina tiene un pH superior a 4,5, se dice que tiene capacidad de neutralización de la acidez y que contiene alcalinidad. Ésta puede resultar de iones OH⁻, carbonato, silicato, borato, ligandos orgánicos, fosfato y amoníaco. La principal fuente de alcalinidad en las aguas de mina es carbonato disuelto, que puede existir en la forma de carbonato (CO₃²⁻) o bicarbonato (HCO₃⁻). Ambos pueden neutralizar la acidez de los protones.



En el rango de pH usual para la mayor parte de las aguas de mina alcalinas (5 a 8), el ion bicarbonato es la principal fuente de alcalinidad.

Alcalinidad y acidez no son términos mutuamente exclusivos. Una comparación de las dos medidas da como resultado la determinación de si el agua es netamente alcalina (alcalinidad mayor que acidez) o netamente ácida (acidez mayor que alcalinidad). Las aguas netamente alcalinas contienen suficiente alcalinidad para neutralizar la acidez mineral representada por el Mn y el hierro ferroso disueltos.

Cuando estos metales se oxidan e hidrolizan, la acidez de los protones que se produce es rápidamente neutralizada por el bicarbonato. Para aguas contaminadas con Fe^{2+} , la reacción neta de los procesos de oxidación, hidrólisis y neutralización es:



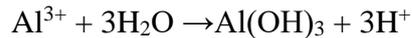
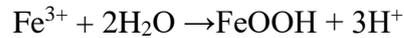
AGUAS ALCALINAS.- Estas aguas de bajo poder de solubilización proceden de la circulación de aguas subterráneas o superficiales a través de materiales calizos o dolomíticos. La disolución del carbonato cálcico tiene lugar debido a la presencia en el agua del anhídrido carbónico, que da lugar a la reacción:



Pueden resultar muy perjudiciales, (a veces tanto como las aguas ácidas), ya que pueden lixiviar materiales que supongan un importante aporte de contaminantes. Son más comunes en minería subterránea que de cielo abierto.

ACIDEZ.- Se pueden considerar tres tipos de acidez: la acidez protónica asociada con el pH (medida de los iones H^+ libres), la acidez orgánica asociada con los compuestos orgánicos disueltos, y la acidez mineral asociada con metales disueltos. (Hedin, *et al.*, 1993). Las aguas de mina generalmente tienen un contenido en carbono orgánico disuelto muy bajo, por tanto, la acidez orgánica es muy baja. La acidez de los efluentes de mina surge fundamentalmente de los protones libres (bajo pH) y de la acidez mineral por Fe, Mn y Al disueltos. Estos metales pueden

sufrir reacciones de hidrólisis que producen H⁺, creando condiciones ácidas con la formación de ácido sulfúrico como resultado.



Se pueden estimar la acidez total de una muestra de agua de mina de acuerdo con las anteriores reacciones. Esta se calcula a partir del pH y de la suma de miliequivalentes de los metales presentes capaces de generar acidez.

$$\text{Acidez calculada} = 50 [2/56 \text{Fe}^{2+} + 3/56 \text{Fe}^{3+} + 3/27 \text{Al} + 2/55 \text{Mn} + 1000(10 - \text{pH})]$$

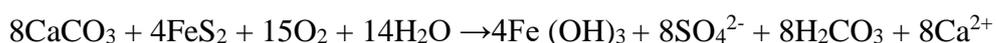
Donde las concentraciones de metales se expresan en mg/l y, dado que 50 es el peso equivalente del CaCO₃, la acidez obtenida mediante esta fórmula pasa a expresarse de miliequivalentes/litro a mg/l de CaCO₃¹¹.

AGUAS ÁCIDAS.- Se generan en la explotación de yacimientos de carbón, sulfuros metálicos o de uranio, quedando expuestos a meteorización grandes volúmenes de materiales sulfurosos y representan la principal causa de contaminación de aguas derivada de la minería. Para su formación es imprescindible la acción bacteriana en condiciones de aerobiosis, e influyen

¹¹ Hedin, R.S., Watzlaf, G.R. and Nairn, R.W. (1994), Passive treatment of acid mine drainage with limestone. *Journal of Environmental Quality*.

también ciertos factores como pH, cantidad de oxígeno y CO₂, temperatura, humedad y características cinéticas, capacidad de neutralización del entorno, etc.

POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE ACIDEZ.- El potencial de producción de acidez (APP) de una muestra determinada es una estimación de la cantidad de ácido que ésta puede llegar a producir. Si se asume que es la pirita el único mineral capaz de generar acidez que está presente en la muestra, el máximo APP se tendrá cuando toda la pirita de la muestra reaccione para formar hidróxido férrico y ácido sulfúrico. Se suele expresar la acidez como la cantidad de carbonato de calcio que sería necesaria para efectuar la neutralización, de acuerdo con la siguiente reacción:



Según la anterior estequiometría, se requiere un mol de CaCO₃ por cada mol de azufre, lo que significa que la acidez producida por 32,08 g de azufre es neutralizada por 100,09 g de CaCO₃ y por tanto, el potencial de producción de acidez del azufre peritico es de 3,125 g de acidez (como CaCO₃) por cada gramo de azufre. Para calcular el APP es necesario determinar la cantidad de pirita presente que pueda ser activa, lo cual no siempre es tarea fácil¹².

TRATAMIENTO ACTIVO DE AGUAS ÁCIDAS.- Se entiende la aplicación de los métodos ortodoxos de depuración de aguas residuales, que generalmente incluyen: el uso de reactivos sintéticos (en este caso, álcalis y floculantes), el uso

¹² Clarke. Lee B. Coal mining and water quality, IEA Coal Reserch, IEA CR/80, July 1995.

de energía eléctrica (para bombeo, para la mezcla de reactivos con agua etc), y sedimentación intensificada (en un estanque o en una clarificadora).

TRATAMIENTO PASIVO DE AGUA ÁCIDA.- Término que no existía antes del año 1990; implica tratamiento en sistemas estáticos (sin bombeo) que contienen materias naturales (abono, piedra caliza, etc). Los sistemas pasivos provocan la mejora de la calidad del agua por reacciones biogeoquímicas, sin el uso de reactivos sintéticos y sin la aplicación de energía externa. El tratamiento pasivo fue desarrollado en los EE-UU con motivo de tener estrategias sostenibles para el tratamiento de aguas de mina a largo plazo, reconociendo que el drenaje contaminado de minas es un fenómeno que suele durar siglos. Aparte de realizar un tratamiento de aguas contaminadas, un sistema pasivo generalmente tiene valores añadidos en términos de ecología.

ESTADO DE OXIDACIÓN.- La variación en el número de electrones se denomina estado de oxidación o valencia, y determina diferencias en el comportamiento químico y físico de las especies de un mismo elemento.

Proceso de oxidación: pérdida de e^- (\uparrow la valencia) $Cu^0 = Cu^{2+} + 2e^-$

Proceso de reducción: ganancia de e^- (\downarrow la valencia) $Cu^{2+} + 2e^- = Cu^0$

DESMONTE.- Se denomina desmonte a la excavación de tierra que se realiza en un determinado entorno con el fin de rebajar la rasante del terreno, reduciendo así su cota y logrando formar un plano de apoyo adecuado para ejecutar una obra.

GANGA.- Es el material que se descarta al extraer la mena de un yacimiento de mineral, por carecer de valor económico o ser demasiado costoso su aprovechamiento.

2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS:

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

Si realizamos el tratamiento de aguas ácidas entonces podemos obtener agua tipo III en la Sociedad Minera El Brocal.

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS

1. Si captamos los metales disueltos que contiene el agua que está siendo tratada entonces podemos obtener agua tipo III.
2. Si obtenemos parámetros de control de flujo que se envía las columnas de carbón activado entonces podemos obtener agua tipo III.
3. Si evaluamos el alimento y descarga de cada columna de carbón activado entonces podemos obtener agua tipo III.

2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

2.5.1. VARIABLE DEPENDIENTE

Obtención de agua tipo III en la Sociedad Minera El Brocal

2.5.2. VARIABLE INDEPENDIENTE

Tratamiento de aguas ácidas

2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador
Obtención de agua tipo III	Agua para uso en agricultura	Obtención de agua para uso en agricultura	Metros cúbicos de agua tipo III	24 horas de tratamiento
Tratamiento de aguas ácidas	Agua con contenidos de metales disueltos. Se debe tratar los parámetros de control de flujo	Tratamiento de las aguas en planta piloto con carbonato de calcio y carbón activado	Metros cúbicos de tratamiento de aguas ácidas pH	Control de acides de las aguas en periodos de 2,4, 8, 16 y 24 horas

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación **experimental** consistió en la manipulación de tres variables no comprobadas, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una elevación del pH y disminución del porcentaje de hierro en el agua acida de mina. Este experimento provocado nos permite introducir determinadas variables de estudio manipuladas, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas del pH, Eh, porcentaje del Fe, alcalinidad etc. En este tipo de investigación el investigador no solo identifica las características que se estudian, sino que las

controla, las altera o manipula con el fin de observar los resultados al tiempo que procura evitar que otros factores intervengan en la observación.

3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Cuando he planteado el proyecto de investigación se me hizo difícil escoger un método como el ideal y único camino para realizar una investigación, pues muchos de ellos se complementan y relacionan entre sí.

A nuestro parecer el método para este trabajo de investigación es APLICADA con apoyo del HIPOTÉTICO-DEDUCTIVO ya que en él se plantea una hipótesis que se puede analizar deductiva o inductivamente y comprobarlo experimentalmente.

La prueba realizada en el campo ambiental nos da una idea clara que significa obtener agua para la agricultura es decir en riego.

3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación es un conjunto de métodos y procedimientos utilizados al coleccionar y analizar medidas de las variables especificadas en la investigación del problema. El diseño de investigación es el marco que ha sido creado para encontrar respuestas a las preguntas de investigación. En esta investigación se desarrolla en un **Diseño Experimental** ya que se basa en la obtención de la información, manipulando las variables. Para cumplir con la metodología y diseño de la investigación, el control de las pruebas experimentales

se llevará a cabo mediante una observación controlada de la variable independiente y de aquellas que intervinieron circunstancialmente y que han afectado o favorecido en los resultados de la variable dependiente.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. POBLACIÓN

Como población de estudio lo considero las reservas probadas y probables que tiene la Sociedad Minera El Brocal S.A.A. que van ser explotadas y el bombeo de las aguas mineras subterráneas.

3.4.2. MUESTRA

Como muestra de estudio es el recojo de las muestras líquidas que serán analizadas en el laboratorio tomando en cuenta que un litro de agua ácida dará inicio a las pruebas que se va corregir en cada momento.

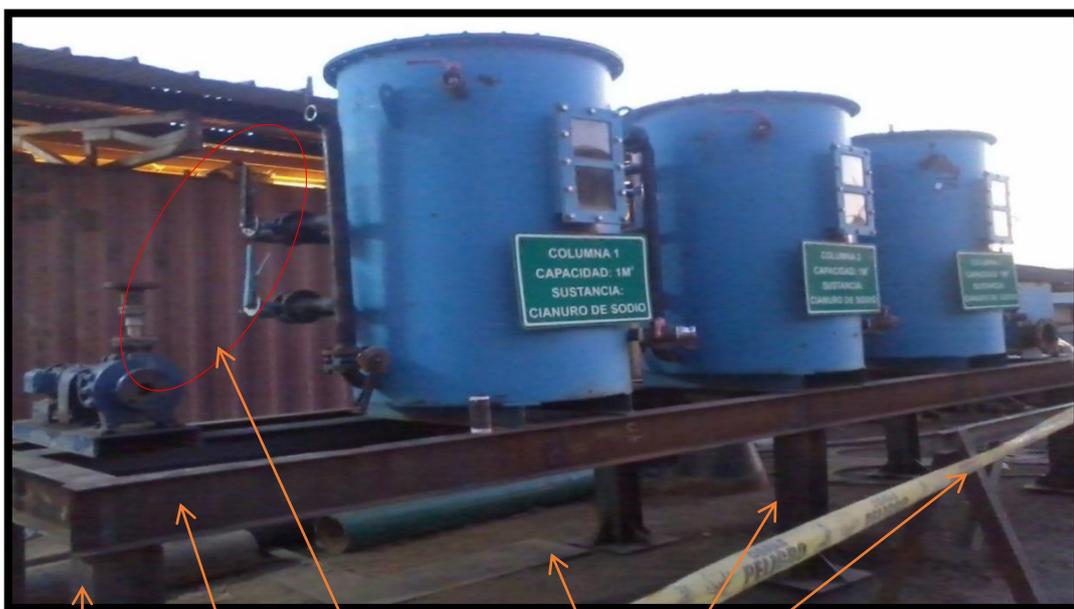
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.5.1. INSTALACIÓN DE LOS TANQUES PARA CEMENTACIÓN DE PARTÍCULAS Y CARBÓN ACTIVADO

1. Se montó las tres columnas conjuntamente con las tuberías de 2" y se empernaron.

2. Falta instalar el flujómetro y soldar una tubería de 2" de llegada hacia la bomba.
3. Se va a soldar la base de las columnas en la plataforma para que sea más segura y no se mueva.
4. El carbón activado no ha llegado al almacén de Brocal.
5. Se preguntó sobre el tema del carbón activado al Ing. Vizcarra y menciono que el carbón llegaría el martes o a más tardar el miércoles de esta semana del presente mes.

Figura N 3.1: Instalación de tanques



- Falta empernar
- Falta flujómetro y tubería de 2"
- Se colocará un codo de acero de 2" con brida en ambos lados y la tubería de succión
- Falta soldar

Fuente: Elaboración propia

6. Todo el montaje se llevará con el camión grúa hacia la planta de tratamiento de agua.
7. La parte eléctrica se instalará en el mismo lugar de ubicación (planta de tratamiento de agua).

Figura N 3.2: Instalación de tanques para carbón activado



Fuente: Elaboración propia

Figura N 3.3: Instalación de tanques para recirculación del agua



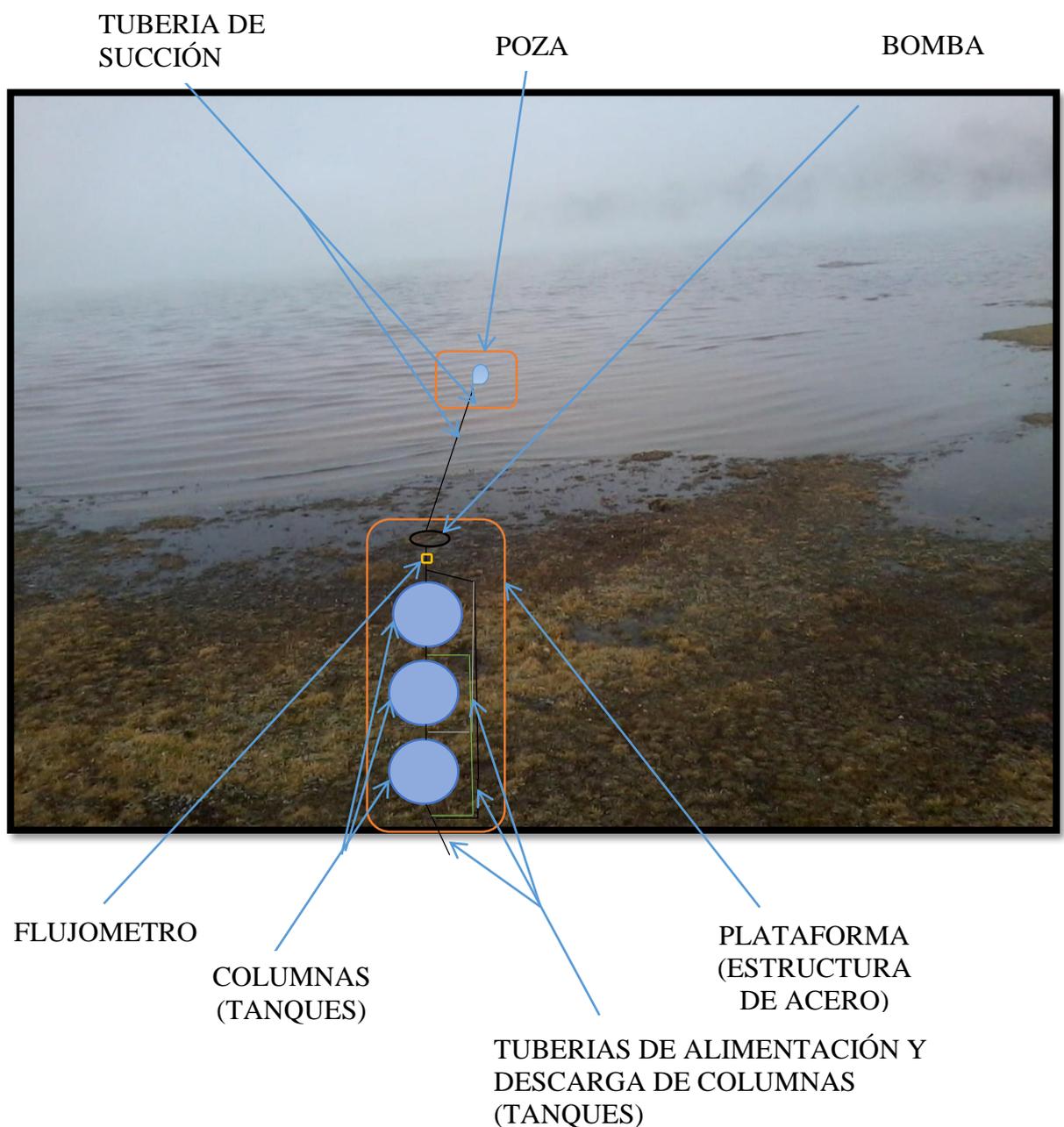
Fuente: Elaboración propia

3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.6.1. UBICACIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUA

Se ubicará a la orilla del agua acumulada del relave al lado izquierdo de la poza que se está construyendo para ubicación de una bomba de succión (obras civiles).

Figura N° 3.4: Planta piloto de tratamiento de agua



Fuente Elaboración propia

3.6.2. NUEVA PLATAFORMA

1. Se descartó la estructura de cinco manantiales porque era muy corta, también era demasiada estructura y muy pesada para esas columnas.
2. En coordinación con el Sr. Palacios se encontró otra plataforma más liviana (en Unicom) lo cual serviría de soporte para los tanques y la bomba.

Figura N° 3.5: Plataforma para recibir tanques



Fuente: Elaboración propia

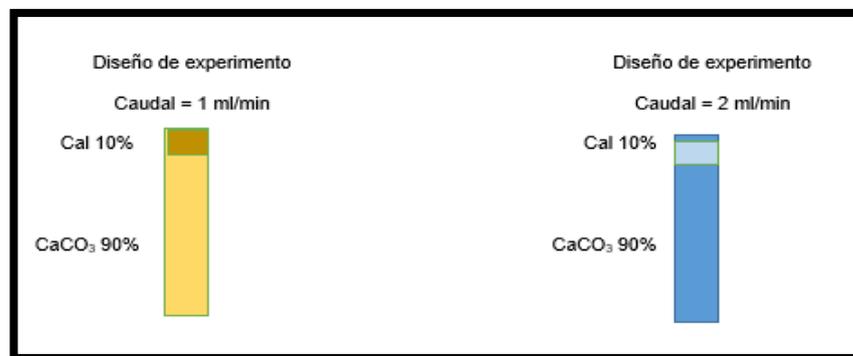
3. Se está soldando las patas de 80 cm de alto a la plataforma, al final de cada pata se soldará una plancha de 40 cm x 40 cm que sirva como soporte de toda la estructura armada, para evitar que se hunda con el peso.
4. Se hará un amarre con estructura en la plataforma para que pueda sentar bien y baya empernado las tres columnas en la plataforma.

3.6.3. MATERIALES

1. Se trajo las columnas y tuberías de conexión (de Unicom) al taller de proyectos para presentarlos, una vez presentado llevarlos a montar a la planta de aguas acidas.
2. Se tiene las válvulas, bomba y flujómetro en el taller de proyectos lo cual irán ubicados en las conexiones de tubería de 2" de diámetro.
3. Se tiene los pernos que se va a usar en la conexión de tuberías de 2" de diámetro.

3.6.4. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Figura N° 3.6: Módulo para el experimento



Fuente: Elaboración propia

Para obtener los datos referentes los 8 procesos de tratamientos de las aguas ácidas se tuvo instalar un módulo con las siguientes características:

- El módulo para el experimento fue construido de metacrilato incoloro.
- Para la toma de datos se hizo circular el agua ácida en sentido descendente a un caudal de 1 ml/min, la cual atravesó un relleno de cal activado (10%) y grava

de carbonato de calcio (90%). El agua ácida tuvo una permanencia en el sistema durante 2 días.

- A la salida del sistema se tomaron a diario el pH y el Eh con los instrumentos digitales, así como también se obtuvieron las muestras de agua para llevarlos al laboratorio de Análisis Químico para las pruebas correspondientes.
- Para completar la recolección de datos referentes a la medición del pH y Eh se realizó 8 combinaciones experimentales en las que en forma paralela se tomó la información del pH y el Eh y muestras para el laboratorio. Para verificar que el sistema se encuentre estable se prolongó la toma de muestra por 10 días consecutivos, donde el sistema alcanzó la estabilidad.

3.6.5. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

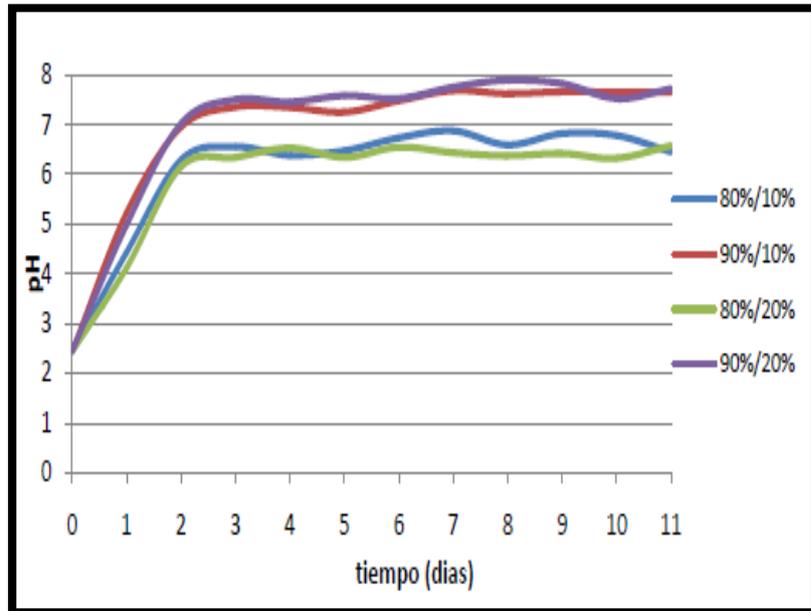
El pH es una de las propiedades químicas del agua cuya evolución en el tiempo es muy importante para la determinación de su calidad, el tiempo en días está referido a la fecha de inicio del experimento, es decir, al tiempo que lleva en funcionamiento el sistema experimental.

En las figuras N° 3.7 y 3.8, se recogen todas las lecturas de pH obtenidas a la salida del proceso de tratamiento y los datos se observan en el Anexo No 5, cabe indicar que el promedio para cada caso, se obtuvo en base a los 8 últimos datos recogidos, considerando que los primeros días el sistema aún no se encuentra estabilizado.

El pH del agua ácida de entrada fue 2,44, mediante un flujo continuo en sentido descendente se hizo atravesar el lecho de grava de carbonato de calcio

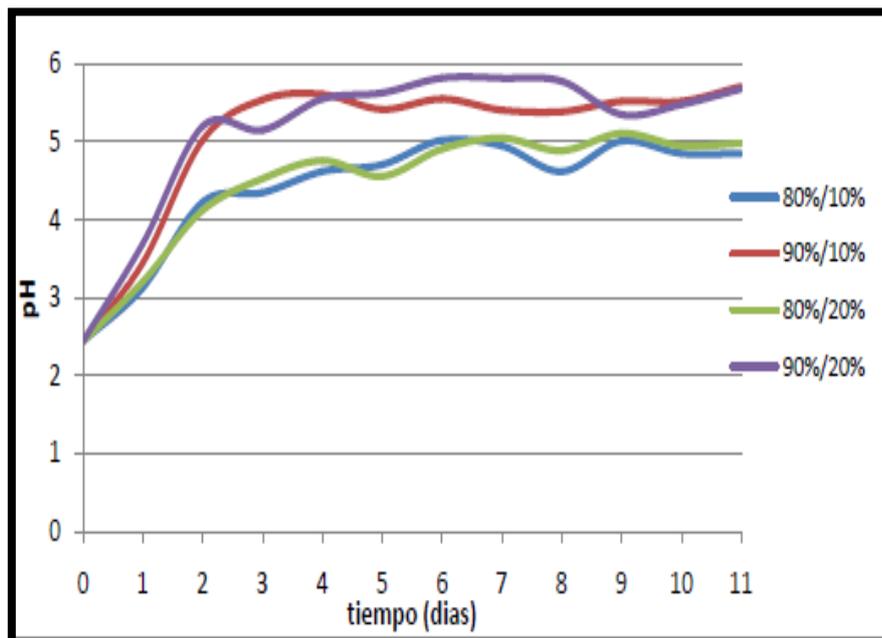
y en un promedio de dos días alcanza su estabilidad y se obtiene un valor promedio del pH de 7,54 cuando el caudal es 1 ml/min y el volumen del carbonato de calcio es el 90% y el 10% de carbón activado.

Gráfico N° 3.7: Evolución del pH: Caudal = 1 ml/min.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.8: Evolución del pH: caudal = 2 ml/min

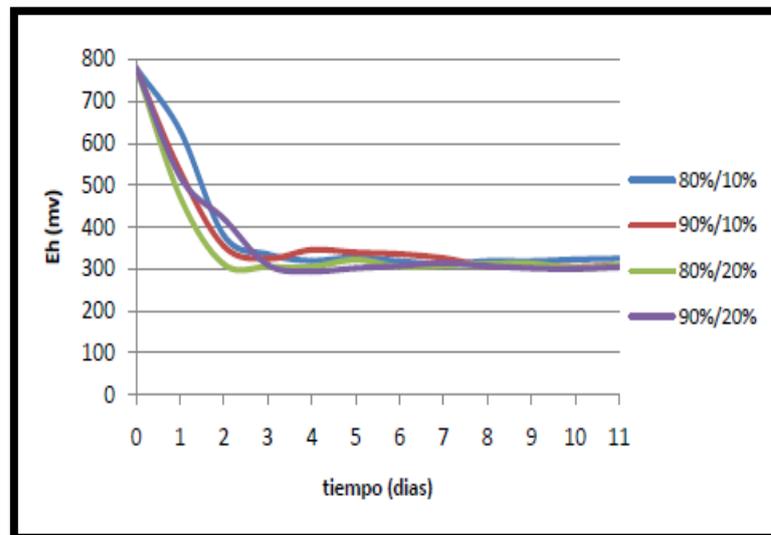


Fuente: Elaboración propia

3.6.6. EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL REDOX (Eh)

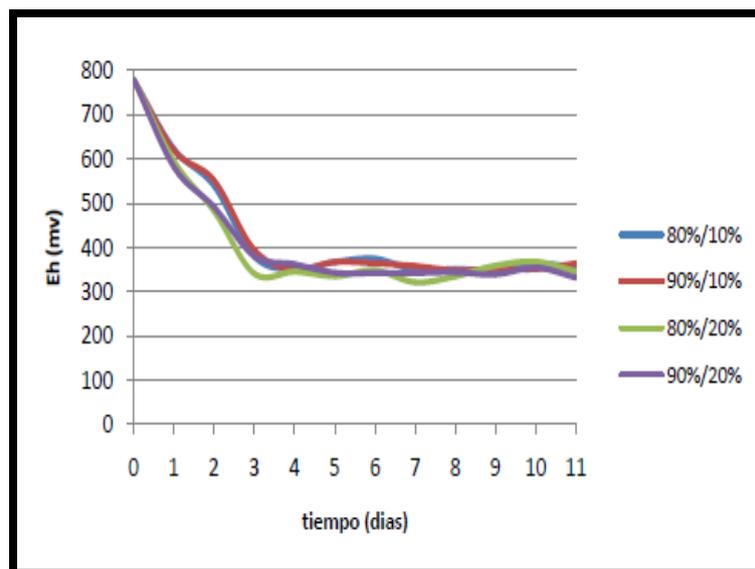
Durante el tratamiento realizado para determinar la evolución del pH también se midió la actividad de los electrones o potencial redox (Eh) en el agua tratada.

Figura N° 3.9: Evolución del Eh: Caudal = 1 ml/min



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.10: Evolución del Eh: Caudal = 2 ml/min

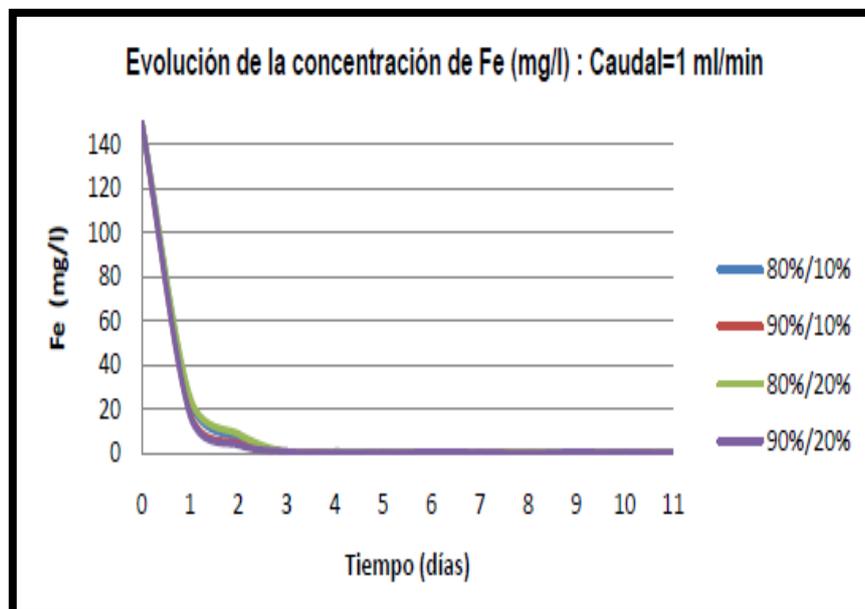


Fuente: Elaboración propia

3.6.7. EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL HIERRO (Fe)

La concentración del hierro durante el proceso de tratamiento del agua ácida, como podemos observar para las diferentes alternativas del tratamiento luego de dos días, los valores que presenta están por debajo de la unidad, generándose un precipitado de color anaranjado.

Figura N° 3.11: Evolución de la concentración del Fe (mg/l): Caudal = 1ml/min



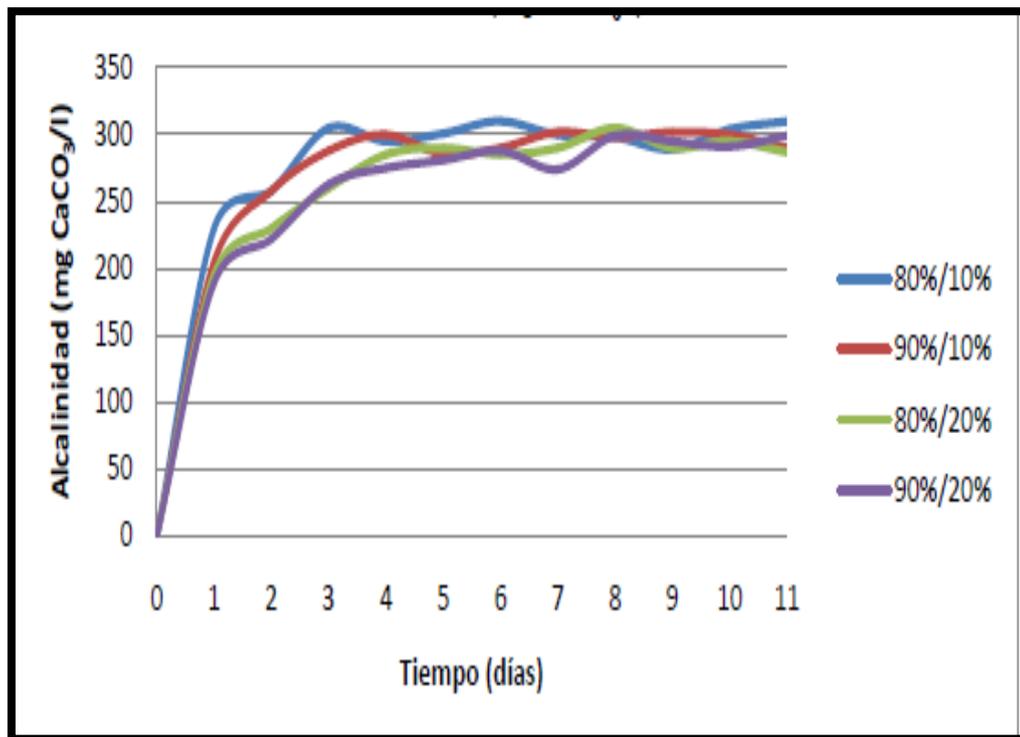
Fuente: Elaboración propia

3.6.8. EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD (CaCO_3/l)

La alcalinidad es un parámetro de calidad representativo de la capacidad para amortiguar los cambios de pH. Esta capacidad viene determinada por los equilibrios químicos del sistema carbonato - bicarbonato. La alcalinidad del agua procede del bicarbonato de calcio y su evolución queda reflejada en las figuras N° 3.12 y 3.13.

La muestra a tratar tiene alcalinidad cero ya que el valor del pH es de 2,44 y muy ácido, cuando esta agua ingresa al sistema de tratamiento observamos que alcanza valores de alcalinidad de hasta 310 mg CaCO₃/l y se estabiliza en un promedio de 295 mg de CaCO₃/l con 90% de carbonato de calcio, 10% de carbón activado para un caudal de 1ml/min.

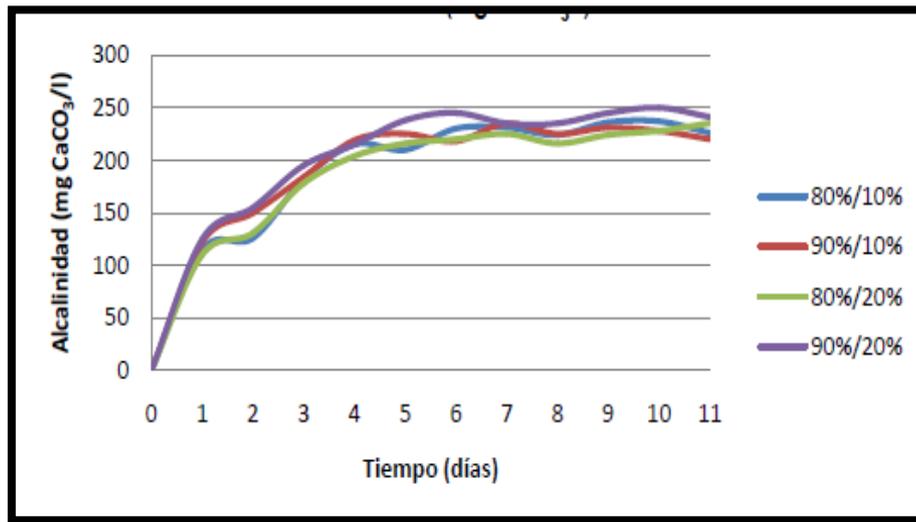
Figura N° 3.12: Evolución de la alcalinidad (mg CaCO₃/l): Caudal = 1 ml/min.



Fuente: Elaboración propia

Cuanto mayor tiempo este el agua en contacto con el material carbonato de calcio mayor será la alcalinidad adoptada, esto nos muestra la influencia positiva que tiene el carbonato de calcio en cuanto a la alcalinidad.

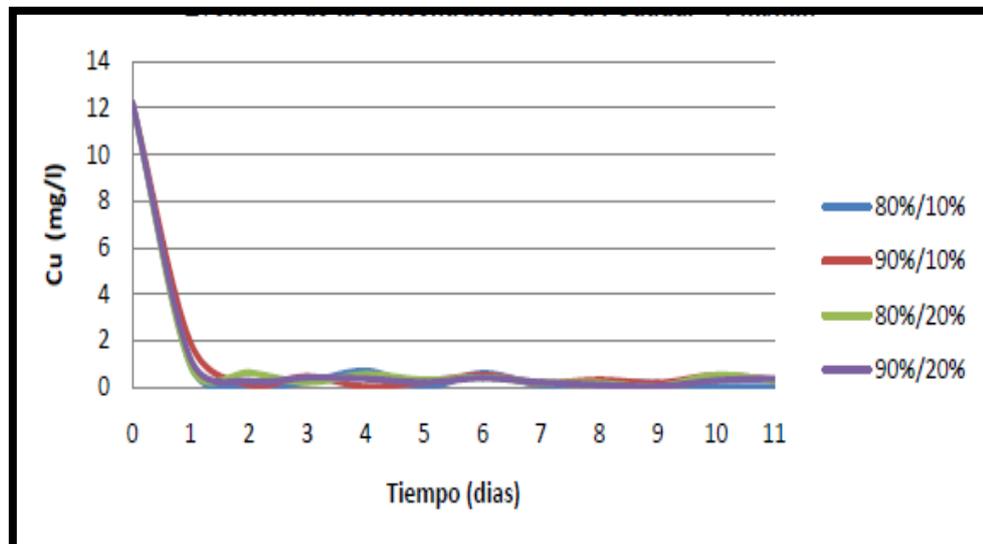
Figura N° 3.13: Evolución de la alcalinidad (mg CaCO₃/l): Caudal = 2 ml/l.



Fuente: Elaboración propia

3.6.9. EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACION DEL Cu

Figura N° 3.14: Evolución de la concentración de Cu: Caudal = 1 ml/min.



Fuente: Elaboración propia

Se muestran los resultados de los análisis realizados de la concentración de Cu, como podemos observar para las diferentes alternativas en un tratamiento luego de un día, los valores que presenta están por debajo de la unidad.

3.6.10. EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL Ca

La disolución del carbonato de calcio conduce a un incremento de la alcalinidad, de la concentración de calcio y del pH, la disolución de la calcita sigue la reacción:

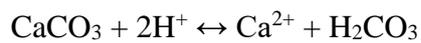
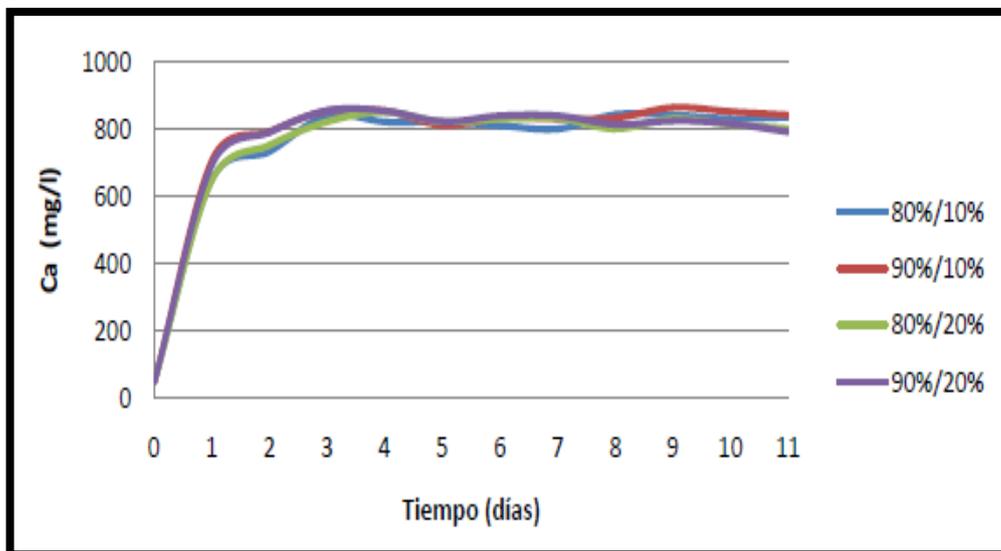


Figura N° 3.15: Evolución de la concentración del Ca: Caudal = 1 ml/min



Fuente: Elaboración propia

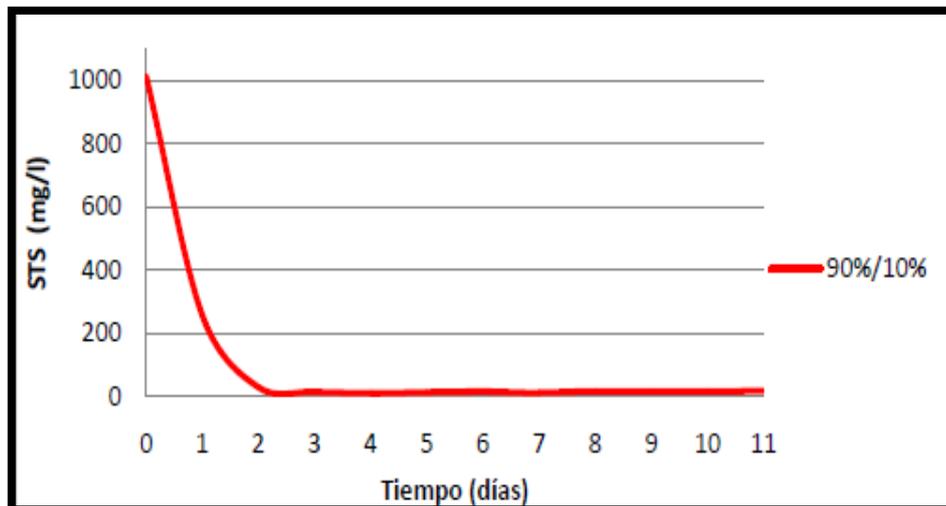
En la figura N° 3.15 se observa que el Ca observado está por encima de los 800 mg/l, esto demuestra una disolución efectiva del carbonato de calcio aumentando el pH y la $[\text{Ca}^{2+}]$ del agua ácida.

En la gráfica N° 3.15 se puede observar la evolución de la concentración del calcio en función del tiempo, se observa una tendencia clara de los valores obtenidos hacia 800 mg/l.

3.6.11. EVOLUCIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES EN SUSPENSIÓN

El término sólidos totales en suspensión STS hace alusión a materia suspendida en el medio acuoso, realizado las mediciones correspondientes se determinó como promedio de 15 mg/l la cantidad de sólidos totales en suspensión, cuando el proceso de tratamiento del agua ácida se realiza con 90% de carbonato de calcio, 10% de carbón activado para un caudal de 1 ml/min.

Figura N° 3.16: Evolución de la concentración de los STS: Caudal = 1 ml/min.



Fuente: Elaboración propia

3.7. ORIENTACIÓN ÉTICA

La presente investigación está autorizada para realizar los trabajos con miras de solucionar los problemas ambientales en la Sociedad Minera El Brocal, el marco teórico y las bases teóricas son extraídas de autores reconocidos debidamente identificados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente investigación que es materia de tesis, se detalla los parámetros de tratamiento de agua, cálculo realizado en la planta piloto de tratamiento de agua en Huachuacaja, donde se ha tomado muestras de las columnas de adsorción para el control de metales disueltos que ingresa de la poza de agua de alimentación a las columnas, contrastándose el flujo del flujómetro para ello se ha tenido en cuenta un volumen determinado del cilindro siendo 0,2019 m³.

Este proceso se lleva a cabo con la finalidad de captar metales disueltos que contiene el agua de Huachuacaja que está siendo tratada. Así como también obtener parámetros de control de flujo que se envía a las columnas de carbón activado.

Estas muestras son tomadas del alimento a cada columna de carbón activado de un compósito del día para poder evaluar lo que sucede en cada columna.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO

4.1.1. MARCO CONTEXTUAL

Colquijirca es una localidad peruana ubicada en la región Pasco, provincia de Pasco, distrito de Tinyahuarco. Se encuentra a una altitud de 4 082 msnm.

Clima

Tabla N° 2.1: Parámetros climáticos promedio de Colquijirca

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Temp. Max. Media °C	26	26	23	20	19	19	20	23	23	25	27,5	26	23,3
Temp. Min. Media °C	19	17	15	14	14,5	13	14	15,5	15,5	16	18,5	19	15,8

Fuente: Accuweather

SOCIEDAD MINERA EL BROCAL

Sociedad Minera El Brocal S.A.A. en su unidad minera Colquijirca, Tinyahuarco – Cerro de Pasco, realiza sus operaciones de explotación bajo el método de tajo abierto en la mina denominada Tajo Norte y subterránea en la mina Marcapunta Norte.

Asimismo, las minas Marcapunta Oeste y San Gregorio constituyen los proyectos de exploración más importantes.

El Brocal realiza sus operaciones en las Unidades Mineras de Colquijirca y la Planta Concentradora de Huaraucaca, localizadas en el distrito de Tinyahuarco, provincia de Pasco, departamento y región de Pasco, Perú.

Figura N° 2.1: Ubicación de la Sociedad Minera el Brocal



Fuente: Google map

El Brocal explota minerales de plata, plomo y zinc en su mina a tajo abierto denominada Tajo Norte y minerales de cobre en su mina subterránea denominada Marcapunta Norte.

El mineral extraído se procesa en una planta de concentración de minerales, con una capacidad de tratamiento de 7 000 toneladas métricas por día y cuenta con toda la infraestructura asociada como centrales hidroeléctricas, sub estaciones, talleres, almacenes, canchas de relaves, planta de tratamiento de aguas ácidas, viviendas y oficinas administrativas.

4.1.2. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES UNIDADES MINERAS EN OPERACIÓN O QUE REINICIAN SU OPERACIÓN

Tabla N° 4.1: Presencia de metales disueltos

VALOR EN CUALQUIER MOMENTO								
pH	TSS (mg/l)	Metales Disueltos						
		Cd (mg/l)	Mn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
5,5>pH<10,5	100	0,05	0,4	1	2	6	5	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.2: Presencia de los elementos metálicos anualmente

VALOR PROMEDIO ANUAL								
pH	TSS (mg/l)	Metales Disueltos						
		Cd (mg/l)	Mn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
5,5>pH<10,5	50	0,04	0,3	0,5	1	3	2	0,5

Fuente: Elaboración propia

UNIDADES MINERAS NUEVAS

Tabla N° 4.3. Presencia de los elementos metálicos

VALOR EN CUALQUIER MOMENTO								
pH	TSS (mg/l)	Metales Disueltos						
		Cd (mg/l)	Mn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
6>pH<9	50	0,05	0,3	0,2	1	3	2	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.4. Presencia de los elementos metálicos anualmente

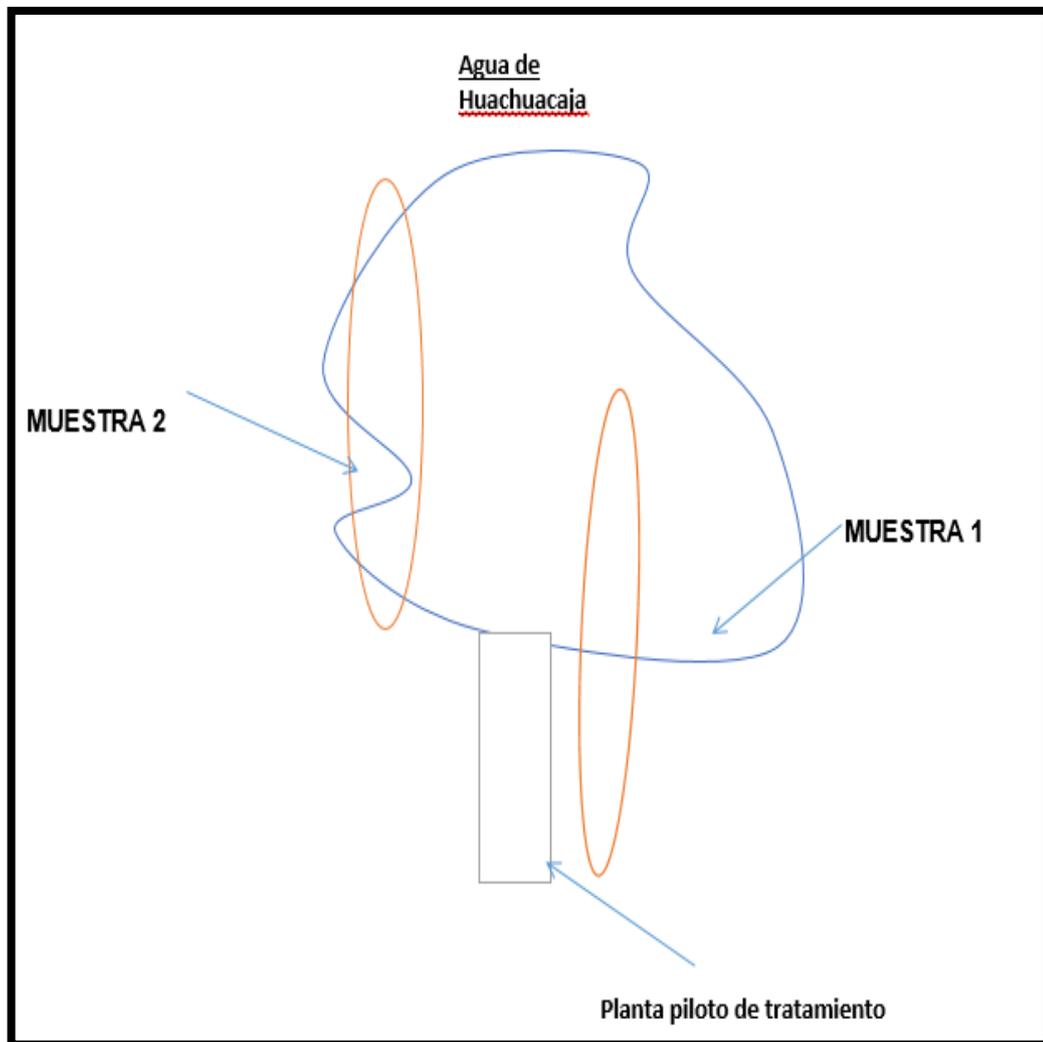
VALOR PROMEDIO ANUAL								
pH	TSS (mg/l)	Metales Disueltos						
		Cd (mg/l)	Mn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
6>pH<9	25	0,04	0,3	0,16	0,4	1,43	1,6	0,5

Fuente: Elaboración propia

4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.2.1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS EN LA PLANTA PILOTO

Figura N° 4.1: Zonas de muestreo para el análisis químico.



Fuente: Elaboración propia

En esta figura se muestra el escenario antes de instalar la planta piloto de tratamiento en columnas de carbón activado ya que en esta zona se encontraron mayor presencia de metales disueltos en el agua sobre todo con respecto al Zinc y Manganeso, siendo este el punto de partida inicial para el tratamiento de agua conocidos como ley de cabeza.

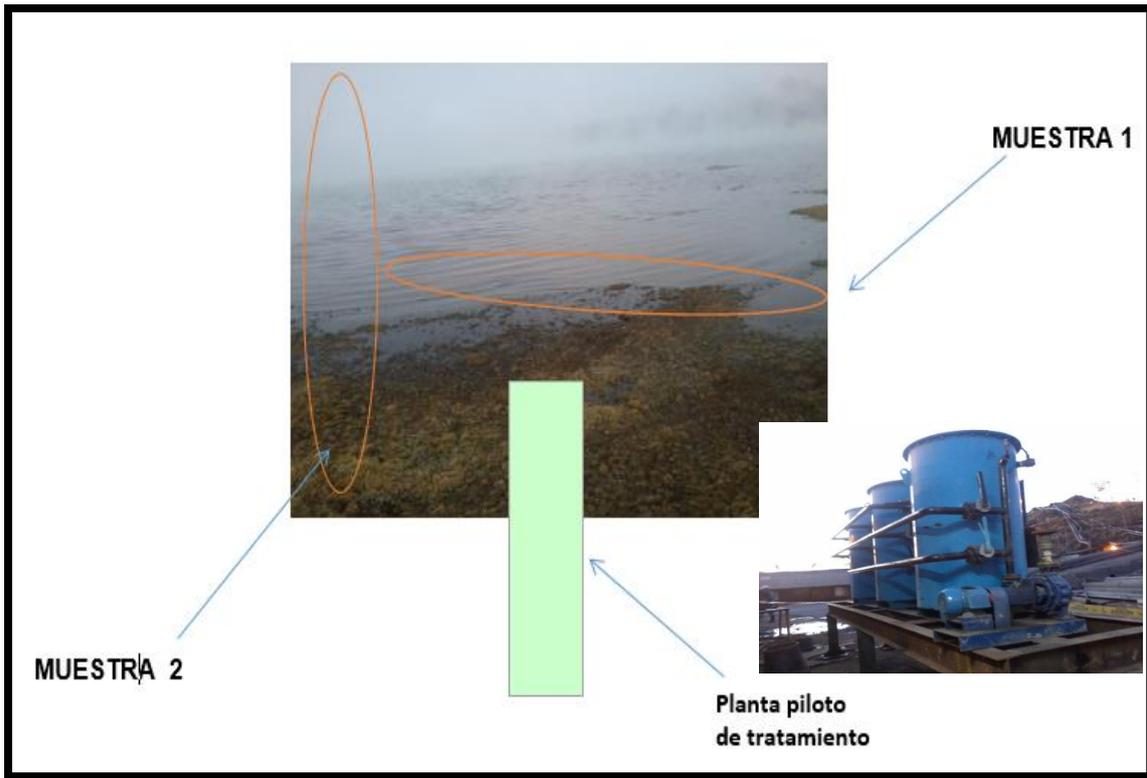
Tabla N° 4.5. Resultados de las dos muestras tomadas del agua de Huachuacaja ley de cabeza.

	pH	TDS mg/l	TSS mg/l	Metales Disueltos							Metales Totales						
				Cd mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Zn mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	As mg/l	Cd mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Zn mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	As mg/l
Muestra 1	7,53		23,0	0,020	0,860	0,100	0,630	0,070	0,130		0,030	1,100	0,150	0,990	0,240	1,850	
Muestra 2	7,12		29,5	0,020	1,350	0,060	2,470	0,090	0,140		0,030	1,850	0,100	3,520	0,230	3,600	

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se muestra los análisis químicos obtenidos de las dos muestras, donde podemos apreciar los metales disueltos y los totales de sólidos en suspensión presentes en el agua teniendo rangos por encima de los límites máximos permisibles como: con respecto a la muestra 1 el Mn se encuentra en 0,860mg/lt siendo como LMP (Límite máximo permisible) Mn = 0,3 mg/lt, los sólidos totales en suspensión (TSS) se encuentran en 23 mg/lt lo cual está por debajo del LMP. Con respecto a la muestra 2 el Mn se encuentra en 1,350 mg/lt, el Zinc se encuentra en 2,470 mg/lt y los TSS se encuentra en 29,5 mg/lt; siendo LMP Mn=0,3 mg/lt, Zn=1,43 mg/lt y TSS=25 mg/lt respectivamente. Estos tres rangos se encuentran fuera del LMP del agua tomando en consideración la tabla N°4.4.

Figura N° 4.2: Zonas de muestreo para el análisis químico



Fuente: Elaboración propia

En esta figura se muestra la ubicación de la planta piloto de tratamiento de agua en columna de carbón activado, aquí se instalaron tres columnas en paralelo y un cajón de descarga final para captar el agua de Huachuacaja, así mismo con obras civiles se realizó un agujero en forma de cuadrado dentro del agua para instalar una bomba de succión que servirá para el alimento de agua a través de un flujómetro instalado en la línea de la alimentación a la primera columna.

Tabla N° 4.6. Parámetros de configuración para el flujómetro.

Descripción	Volumen	Caudal
Volumen del cilindro	0,2019 m ³	4,04 m ³ /Hr
Volumen acumulado del flujómetro	0,1997 m ³	3,99 m ³ /Hr
Margen de Error	0,0022 m ³	0,04 m ³ /Hr
Margen de Error	1,0896 %	1,09 %

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla observamos el caudal de 0,2019 m³ necesario para poder tener control sobre los metales disueltos ya que cuando se incrementa pasa más rápido por las columnas de carbón y esto no ayuda a precipitar los metales sobre todo el manganeso que es el que más se encuentra por encima del LMP.

Una vez iniciada el arranque de la plantita piloto se realizaron ajustes de flujo de alimentación y se adicionaron carbón activado a las tres columnas, de los cuales se obtuvieron resultados de análisis químicos de las muestras tomadas de la alimentación, de cada columna y de la descarga.

Tabla N° 4.7. Resultados de las muestras tomadas de las descargas a diferentes flujos.

	pH	TDS mg/l	TSS mg/l	Metales Disueltos							Metales Totales						
				Cd mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Zn mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	As mg/l	Cd mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Zn mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	As mg/l
Muestra A			15,33	0,010	0,150	0,030	0,180	0,120	0,130		0,010	0,110	0,110	0,190	0,130	1,020	
Muestra B			29,67	0,010	0,310	0,010	0,220	0,130	0,110		0,010	0,320	0,060	0,110	0,120	1,310	

Fuente: Elaboración propia

Estas muestras fueron tomadas de un compósito de 2 horas obteniendo la primera Muestra A con un flujo de 0,4108 l/s lo cual nos da un resultado en el análisis químico por debajo del LMP tomando en cuenta en Mn, Zn y TSS con respecto a la ley de cabeza (Muestra 1 y 2) son los que más altos que se encuentran estos metales disueltos; mientras que la otra Muestra B se tomó con un flujo de 0,8019 l/s dando resultado alto como: TSS = 29,67 mg/l, Mn = 0,31 mg/l y el Zn en 0,22 mg/l.

Tabla N° 4.8. Resultados de las muestras de agua de las columnas de carbón activado de 1 día.

	pH	TDS mg/l	TSS mg/l	Metales Disueltos							Metales Totales						
				Cd mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Zn mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	As mg/l	Cd mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Zn mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	As mg/l
Alimento día			28,5	0,010	1,100	0,040	0,810	0,440	0,220		0,010	1,270	0,900	1,060	0,970	0,800	
Columna 1 Día			27,67	0,010	0,810	0,060	0,770	0,120	0,170		0,010	0,350	0,900	0,170	0,130	1,690	
Columna 2 día			19,67	0,010	0,310	0,050	0,670	0,110	0,130		0,010	1,230	0,120	2,000	0,120	1,280	
Columna 3 Día			16,67	0,010	0,270	0,030	0,610	0,100	0,180		0,010	0,900	0,070	0,880	0,110	0,680	
Descarga Día			20,67	0,010	0,240	0,030	0,150	0,100	0,090		0,010	0,540	0,080	0,360	0,130	2,070	

Fuente: Elaboración propia

Aquí se muestran los resultados de metales disueltos de las 5 muestras, en la última muestra es decir la descarga final de las columnas de carbón el LMP de estos elementos como: TSS = 20,67 mg/l, Mn = 0,24 mg/l y el Zn en 0,15 mg/l. Teniendo en cuenta que el alimento a este circuito con respecto a esto elementos es mayor TSS = 28,5 mg/l, Mn = 1,1 mg/l y el Zn en 0,81 mg/l. Esto quiere decir que el carbón activo ayuda a precipitar a los metales disueltos en el agua.

4.2.2. BALANCE DEL CIRCUITO DE ADSORCIÓN DE LA PLANTA PILOTO

La prueba de tratamiento de aguas en columna de carbón activado realizado durante 6 días tomando muestras y realizando en control del flujo día y noche una vez establecida el circuito se da inicio el 5 de agosto se paraliza el día 10 de agosto a horas 6:00 pm de la tarde, flujo acumulado de 355,51 m³.

Tabla N° 4.9. Planta piloto de tratamiento de agua.

Fecha	Hora		Vol. Acumulado m ³ Circuito de Adsorción		
			Inicio	Final	Acumulado
5-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	0.00	0.00	0.00
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	0.00	3.72	3.68
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	3.72	10.58	6.78
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	10.58	32.80	21.97
6-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	32.80	54.63	21.60
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	54.63	64.63	9.89
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	64.63	73.21	8.48
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	73.21	93.03	19.61
7-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	93.03	123.49	30.13
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	123.49	133.49	9.89
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	133.49	148.12	14.47
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	148.12	162.15	13.87
8-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	162.15	186.35	23.93
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	186.35	209.39	22.79
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	209.39	219.03	9.54
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	219.03	238.00	18.76
9-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	238.00	256.21	18.00
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	256.21	273.83	17.43
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	273.83	293.62	19.57
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	293.62	312.23	18.41
10-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	312.23	331.22	18.78
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	331.22	350.47	19.03
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	350.47	355.51	4.99
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	355.51	355.51	0.00

Fuente: Elaboración propia

Se toma estos 6 días para obtener datos dentro de lo requerido ya que se mantiene constante; se continúa trabajando, pero ya no se toma muestras ni flujo constantes

cada día solo puntualmente.

Los datos para el funcionamiento de la planta piloto fueron:

- El flujo usado es 0,4108 l/s
- El cilindro 0,2019 m³
- El tiempo es 0,5 Hrs

Se analizaron los metales disueltos Cadmio, Manganeso, Plomo, Zinc, Cobre y Hierro en el agua de todas las muestras tomadas en esos días obteniéndose resultados favorables lo cual se muestran en las siguientes tablas:

Tabla N° 4.10: Balance del Circuito Cadmio.

BALANCE CIRCUITO DE ADSORCION Cd																									
Fecha	Hora	COLUMNA N° 1						COLUMNA N° 2						COLUMNA N° 3						CIRCUITO TOTAL DE ADSORCION					
		Volumen m ³	IN mg/l	OUT mg/l	PARCIAL gr	Acum. gr	Eficiencia %	Volumen m ³	IN mg/l	OUT mg/l	PARCIAL gr	Acum. gr	Eficiencia %	Volumen m ³	IN ml/l	OUT ml/l	PARCIAL gr	Acum. gr	Eficiencia %	Volumen m ³	IN mg/l	OUT mg/l	PARCIAL gr	Acum. gr	Eficiencia %
5-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	3.68	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	3.68	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	3.68	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	6.78	0.02	0.01	0.03	0.03	33.33	6.78	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	6.78	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	21.97	0.03	0.02	0.22	0.25	33.33	21.97	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	21.97	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	21.60	0.03	0.02	0.22	0.47	33.33	21.60	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	21.60	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	9.89	0.03	0.02	0.10	0.57	33.33	9.89	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	9.89	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	8.48	0.02	0.02	0.00	0.57	0.00	8.48	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	8.48	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	19.61	0.02	0.02	0.00	0.57	0.00	19.61	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	19.61	0.02	0.01	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	50.00
7-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	30.13	0.03	0.02	0.30	0.87	33.33	30.13	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	30.13	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	9.89	0.03	0.02	0.10	0.97	33.33	9.89	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	9.89	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	14.47	0.01	0.01	0.00	0.97	0.00	14.47	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	14.47	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	13.87	0.01	0.01	0.00	0.97	0.00	13.87	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	13.87	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
8-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	23.93	0.01	0.01	0.00	0.97	0.00	23.93	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	23.93	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	22.79	0.01	0.01	0.00	0.97	0.00	22.79	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	22.79	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	9.54	0.01	0.01	0.00	0.97	0.00	9.54	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	9.54	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	18.76	0.01	0.01	0.00	0.97	0.00	18.76	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	18.76	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
9-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	18.00	0.01	0.01	0.00	0.97	0.00	18.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	18.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	17.43	0.01	0.01	0.00	0.97	0.00	17.43	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	17.43	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	19.57	0.03	0.03	0.00	0.97	0.00	19.57	0.03	0.02	0.20	0.20	33.33	19.57	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	18.41	0.04	0.02	0.37	1.34	50.00	18.41	0.02	0.02	0.00	0.20	0.00	18.41	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
10-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	18.78	0.02	0.02	0.00	1.34	0.00	18.78	0.02	0.02	0.00	0.20	0.00	18.78	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	19.03	0.02	0.02	0.00	1.34	0.00	19.03	0.02	0.02	0.00	0.20	0.00	19.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	4.99	0.08	0.05	0.15	1.49	36.68	4.99	0.05	0.05	0.00	0.20	0.00	4.99	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	1.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

En estas tablas se observa la precipitación del metal disuelto como es el Cd, siendo como último resultado entre **0,02 a 0,05**

mg/lt esto no es muy relevante ya que se encuentra controlado.

Tabla N° 4.11: Balance del Circuito Manganeseo.

BALANCE CIRCUITO DE ADSORCION Mn																									
Fecha	Hora	COLUMNA N° 1						COLUMNA N° 2						COLUMNA N° 3						CIRCUITO TOTAL DE ADSORCION					
		Volumen m³	IN mg/l	OUT mg/l	PARCIAL gr	Acum. gr	Eficiencia %	Volumen m³	IN mg/l	OUT mg/l	PARCIAL gr	Acum. gr	Eficiencia %	Volumen m³	IN mg/l	OUT mg/l	PARCIAL gr	Acum. gr	Eficiencia %	Volumen m³	IN mg/l	OUT mg/l	PARCIAL gr	Acum. gr	Eficiencia %
5-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	3.68	0.81	0.41	1.47	1.47	49.38	3.68	0.41	0.27	0.52	0.52	34.15	3.68	0.27	0.24	0.11	0.11	11.11	3.68	0.81	0.24	2.10	2.10	70.37
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	6.78	0.81	0.40	2.78	4.25	50.62	6.78	0.40	0.27	0.88	1.40	32.50	6.78	0.27	0.24	0.22	0.33	11.85	6.78	0.81	0.24	3.88	5.98	70.62
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	21.97	1.18	0.97	4.61	8.87	17.80	21.97	0.97	0.86	2.42	3.81	11.34	21.97	0.86	0.75	2.42	2.74	12.79	21.97	1.18	0.75	9.45	15.43	36.44
6-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	21.60	1.19	0.97	4.58	13.45	17.88	21.60	0.97	0.86	2.46	6.28	11.70	21.60	0.86	0.75	2.48	5.23	13.37	21.60	1.19	0.75	9.52	24.95	37.18
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	9.89	0.99	0.82	1.68	15.13	17.17	9.89	0.82	0.62	1.98	8.25	24.39	9.89	0.73	0.62	1.09	6.32	15.07	9.89	0.99	0.62	3.66	28.61	37.37
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	8.48	0.99	0.82	1.44	16.57	17.17	8.48	0.82	0.62	1.70	9.95	24.39	8.48	0.73	0.62	0.93	7.25	15.07	8.48	0.99	0.62	3.14	31.75	37.37
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	19.61	1.06	1.03	0.59	17.16	2.83	19.61	1.03	1.02	0.20	10.15	0.97	19.61	1.02	1.02	0.00	7.25	0.00	19.61	1.06	1.02	0.78	32.53	3.77
7-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	30.13	1.14	1.13	0.30	17.46	0.88	30.13	1.13	1.07	1.81	11.95	5.31	30.13	1.07	1.04	0.90	8.15	2.80	30.13	1.14	1.04	3.01	35.54	8.77
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	9.89	1.14	1.13	0.10	17.56	0.88	9.89	1.13	1.07	0.59	12.55	5.31	9.89	1.07	1.04	0.30	8.45	2.80	9.89	1.14	1.04	0.99	36.53	8.77
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	14.47	1.21	1.20	0.14	17.70	0.83	14.47	1.20	1.13	1.01	13.56	5.83	14.47	1.13	1.07	0.87	9.32	5.31	14.47	1.21	1.07	2.03	38.56	11.57
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	13.87	1.32	1.27	0.69	18.40	3.79	13.87	1.27	1.23	0.55	14.11	3.15	13.87	1.23	1.17	0.83	10.15	4.88	13.87	1.32	1.17	2.08	40.64	11.36
8-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	23.93	1.30	1.29	0.24	18.63	0.77	23.93	1.29	1.28	0.24	14.35	0.78	23.93	1.28	1.18	2.39	12.54	7.81	23.93	1.30	1.18	2.87	43.51	9.23
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	22.79	0.98	0.96	0.46	19.09	2.04	22.79	0.96	0.96	0.00	14.35	0.00	22.79	0.96	0.96	0.00	12.54	0.00	22.79	0.98	0.96	0.46	43.97	2.04
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	9.54	1.27	1.26	0.10	19.19	0.79	9.54	1.26	1.16	0.95	15.31	7.94	9.54	1.16	1.16	0.00	12.54	0.00	9.54	1.27	1.16	1.05	45.02	8.66
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	18.76	1.27	1.25	0.38	19.56	1.57	18.76	1.25	1.25	0.00	15.31	0.00	18.76	1.25	1.23	0.38	12.92	1.60	18.76	1.27	1.23	0.75	45.77	3.15
9-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	18.00	1.50	1.49	0.18	19.74	0.67	18.00	1.49	1.48	0.18	15.49	0.67	18.00	1.48	1.48	0.00	12.92	0.00	18.00	1.50	1.48	0.36	46.13	1.33
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	17.43	1.26	1.19	1.22	20.96	5.56	17.43	1.19	1.18	0.17	15.66	0.84	17.43	1.18	1.18	0.00	12.92	0.00	17.43	1.26	1.18	1.39	47.52	6.35
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	19.57	1.70	1.56	2.74	23.70	8.24	19.57	2.10	2.04	1.17	16.84	2.86	19.57	1.85	1.48	7.24	20.16	20.01	19.57	1.70	1.48	4.31	51.83	12.94
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	18.41	2.45	2.40	0.92	24.62	2.04	18.41	2.40	2.36	0.74	17.57	1.67	18.41	2.36	2.35	0.18	20.34	0.42	18.41	2.45	2.35	1.84	53.67	4.08
10-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	18.78	2.00	2.00	0.00	24.62	0.00	18.78	1.49	1.48	0.19	17.76	0.67	18.78	1.51	1.39	2.25	22.60	7.95	18.78	2.00	1.39	11.46	65.12	30.50
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	19.03	1.52	1.51	0.19	24.81	0.66	19.03	1.51	1.44	1.33	19.09	4.64	19.03	1.30	1.20	1.90	24.50	7.69	19.03	1.52	1.20	6.09	71.21	21.05
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	4.99	2.01	2.00	0.01	24.82	0.07	4.99	0.96	0.95	0.05	19.14	1.04	4.99	1.12	1.00	0.58	25.09	10.45	4.99	2.01	1.00	5.00	76.21	49.98
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	24.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	76.21	0.00

Fuente: Elaboración propia

En estas tablas se observa la precipitación del metal disuelto como es el Mn, teniendo como resultado entre **0,24 a 0,75**

mg/l esto es muy relevante ya que a un inicio como cabeza se encontró por encima de 0,86 a 1,35 mg/l.

Tabla N° 4.12: Balance del circuito Plomo.

BALANCE CIRCUITO DE ADSORCION Pb																										
Fecha	Hora		COLUMNA N° 1						COLUMNA N° 2						COLUMNA N° 3						CIRCUITO TOTAL DE ADSORCION					
			Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia
			m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%
5-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	3.68	0.06	0.05	0.04	0.04	16.67	3.68	0.05	0.04	0.04	0.04	20.00	3.68	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	25.00	3.68	0.06	0.03	0.11	50.00
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	6.78	0.05	0.04	0.07	0.10	20.00	6.78	0.04	0.03	0.07	0.10	25.00	6.78	0.03	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00	6.78	0.05	0.03	0.14	40.00
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	21.97	0.19	0.17	0.44	0.54	10.53	21.97	0.17	0.15	0.44	0.54	11.76	21.97	0.15	0.13	0.44	0.48	0.48	13.33	21.97	0.19	0.13	1.32	1.56
6-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	21.60	0.19	0.17	0.35	0.89	8.42	21.60	0.17	0.15	0.48	1.02	12.64	21.60	0.15	0.13	0.48	0.95	14.47	21.60	0.19	0.13	1.30	2.86	31.58
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	9.89	0.19	0.17	0.16	1.05	8.42	9.89	0.17	0.15	0.22	1.24	12.64	9.89	0.15	0.13	0.22	1.17	14.47	9.89	0.19	0.13	0.59	3.45	31.58
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	8.48	0.12	0.11	0.08	1.13	8.33	8.48	0.11	0.08	0.25	1.49	27.27	8.48	0.08	0.07	0.08	1.25	12.50	8.48	0.12	0.07	0.42	3.88	41.67
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	19.61	0.16	0.15	0.20	1.33	6.25	19.61	0.15	0.14	0.20	1.69	6.67	19.61	0.14	0.14	0.00	1.25	0.00	19.61	0.16	0.14	0.39	4.27	12.50
7-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	30.13	0.17	0.16	0.30	1.63	5.88	30.13	0.16	0.15	0.30	1.99	6.25	30.13	0.15	0.14	0.30	1.56	6.67	30.13	0.17	0.14	0.90	5.17	17.65
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	9.89	0.17	0.16	0.10	1.73	5.88	9.89	0.16	0.15	0.10	2.09	6.25	9.89	0.15	0.14	0.10	1.65	6.67	9.89	0.17	0.14	0.30	5.47	17.65
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	14.47	0.07	0.06	0.14	1.87	14.29	14.47	0.06	0.04	0.29	2.38	33.33	14.47	0.04	0.03	0.14	1.80	25.00	14.47	0.07	0.03	0.58	6.05	57.14
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	13.87	0.12	0.09	0.42	2.29	25.00	13.87	0.09	0.09	0.00	2.38	0.00	13.87	0.09	0.07	0.28	2.08	22.22	13.87	0.12	0.07	0.69	6.74	41.67
8-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	23.93	0.16	0.14	0.48	2.77	12.50	23.93	0.14	0.11	0.72	3.09	21.43	23.93	0.11	0.08	0.72	2.79	27.27	23.93	0.16	0.08	1.91	8.66	50.00
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	22.79	0.11	0.09	0.46	3.22	18.18	22.79	0.09	0.07	0.46	3.55	22.22	22.79	0.07	0.01	1.30	4.09	81.43	22.79	0.11	0.01	2.21	10.87	88.18
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	9.54	0.10	0.09	0.10	3.32	10.00	9.54	0.09	0.08	0.10	3.65	11.11	9.54	0.08	0.06	0.19	4.28	25.00	9.54	0.10	0.06	0.38	11.25	40.00
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	18.76	0.10	0.10	0.00	3.32	0.00	18.76	0.10	0.10	0.00	3.65	0.00	18.76	0.10	0.08	0.38	4.66	20.00	18.76	0.10	0.08	0.38	11.62	20.00
9-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	18.00	0.14	0.12	0.36	3.68	14.29	18.00	0.12	0.12	0.00	3.65	0.00	18.00	0.12	0.12	0.00	4.66	0.00	18.00	0.14	0.12	0.36	11.98	14.29
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	17.43	0.08	0.05	0.52	4.20	37.50	17.43	0.05	0.05	0.00	3.65	0.00	17.43	0.05	0.05	0.00	4.66	0.00	17.43	0.08	0.05	0.52	12.51	37.50
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	19.57	0.10	0.08	0.39	4.59	20.00	19.57	0.08	0.02	1.17	4.82	75.00	19.57	0.02	0.01	0.20	4.85	50.00	19.57	0.10	0.01	1.76	14.27	90.00
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	18.41	0.09	0.09	0.00	4.59	0.00	18.41	0.09	0.07	0.37	5.19	22.22	18.41	0.07	0.05	0.37	5.22	28.57	18.41	0.09	0.05	0.74	15.00	44.44
10-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	18.78	0.15	0.10	0.94	5.53	33.33	18.78	0.10	0.10	0.00	5.19	0.00	18.78	0.10	0.07	0.56	5.79	30.00	18.78	0.15	0.07	1.50	16.51	53.33
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	19.03	0.12	0.09	0.57	6.10	25.00	19.03	0.09	0.07	0.38	5.57	22.22	19.03	0.07	0.07	0.00	5.79	0.00	19.03	0.12	0.07	0.95	17.46	41.67
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	4.99	0.60	0.51	0.44	6.54	14.68	4.99	0.51	0.48	0.13	5.70	5.13	4.99	0.48	0.41	0.36	6.15	15.01	4.99	0.60	0.41	0.93	18.39	31.21
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	6.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.39	0.00

Fuente: Elaboración propia

En estas tablas se observa la precipitación del metal disuelto como es el Pb, siendo como último resultado entre **0,07 a**

0,41 mg/lit esto no es muy relevante ya que se encuentra controlado.

Tabla N° 4.13: Balance del Circuito Zinc.

BALANCE CIRCUITO DE ADSORCION Zn																										
Fecha	Hora		COLUMNA N° 1						COLUMNA N° 2						COLUMNA N° 3						CIRCUITO TOTAL DE ADSORCION					
			Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia
			m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%
5-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	3.68	0.81	0.61	0.74	0.74	24.69	3.68	0.61	0.15	1.69	1.69	75.41	3.68	0.15	0.07	0.29	0.29	53.33	3.68	0.81	0.07	2.72	2.72	91.36
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	6.78	0.61	0.15	3.12	3.86	75.41	6.78	0.15	0.07	0.54	2.24	53.33	6.78	0.07	0.00	0.00	0.29	0.00	6.78	0.61	0.07	3.66	6.39	88.52
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	21.97	1.68	0.70	21.53	25.39	58.33	21.97	0.70	0.34	7.91	10.15	51.43	21.97	0.34	0.11	5.05	5.35	67.65	21.97	1.68	0.11	34.49	40.88	93.45
6-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	21.60	1.69	0.70	21.38	46.77	58.58	21.60	0.70	0.35	7.56	17.70	50.00	21.60	0.35	0.11	5.18	10.53	68.57	21.60	1.69	0.11	34.12	75.00	93.49
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	9.89	1.69	0.70	9.79	56.56	58.58	9.89	0.70	0.35	3.46	21.17	50.00	9.89	0.35	0.11	2.37	12.90	68.57	9.89	1.69	0.11	15.63	90.63	93.49
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	8.48	1.68	0.86	6.95	63.51	48.81	8.48	0.86	0.21	5.51	26.68	75.58	8.48	0.21	0.17	0.34	13.24	19.05	8.48	1.68	0.17	12.80	103.43	89.88
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	19.61	2.35	1.79	10.98	74.49	23.83	19.61	1.79	1.42	7.25	33.93	20.67	19.61	1.42	0.72	13.72	26.97	49.30	19.61	2.35	0.72	31.96	135.39	69.36
7-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	30.13	2.35	1.89	13.86	88.35	19.57	30.13	1.89	1.72	5.12	39.05	8.99	30.13	1.72	1.22	15.06	42.03	29.07	30.13	2.35	1.22	34.05	169.44	48.09
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	9.89	2.35	1.89	4.55	92.90	19.57	9.89	1.80	1.70	0.99	40.04	5.56	9.89	1.72	1.22	4.94	46.98	29.07	9.89	2.35	1.22	11.18	180.61	48.09
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	14.47	1.87	1.28	8.54	101.44	31.55	14.47	1.28	0.86	6.08	46.12	32.81	14.47	0.86	0.65	3.04	50.02	24.42	14.47	1.87	0.65	17.65	198.26	65.24
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	13.87	3.24	2.36	12.21	113.65	27.16	13.87	2.36	2.00	4.99	51.11	15.25	13.87	2.00	1.15	11.79	61.81	42.50	13.87	3.24	1.15	29.00	227.26	64.51
8-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	23.93	2.66	2.64	0.48	114.12	0.75	23.93	2.64	2.61	0.72	51.83	1.14	23.93	2.61	2.05	13.40	75.21	21.46	23.93	2.66	2.05	14.60	241.86	22.93
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	22.79	1.51	1.46	1.14	115.26	3.31	22.79	1.46	1.43	0.68	52.52	2.05	22.79	1.43	1.33	2.28	77.49	6.99	22.79	1.51	1.33	4.10	245.96	11.92
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	9.54	1.72	1.57	1.43	116.69	8.72	9.54	1.57	1.26	2.96	55.47	19.75	9.54	1.26	1.10	1.53	79.01	12.70	9.54	1.72	1.10	5.92	251.87	36.05
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	18.76	2.25	1.97	5.25	121.95	12.44	18.76	1.97	1.78	3.56	59.04	9.64	18.76	1.78	1.40	7.13	86.14	21.35	18.76	2.25	1.40	15.94	267.82	37.78
9-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	18.00	2.83	2.81	0.36	122.31	0.71	18.00	2.81	2.57	4.32	63.36	8.54	18.00	2.57	2.15	7.56	93.70	16.34	18.00	2.83	2.15	12.24	280.06	24.03
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	17.43	2.09	2.07	0.35	122.66	0.96	17.43	2.07	2.04	0.52	63.88	1.45	17.43	2.04	2.01	0.52	94.23	1.47	17.43	2.09	2.01	1.39	281.46	3.83
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	19.57	8.10	8.00	1.96	124.61	1.23	19.57	8.00	7.50	9.78	73.67	6.25	19.57	7.50	5.90	31.31	125.54	21.33	19.57	8.10	5.90	43.05	324.51	27.16
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	18.41	8.40	7.60	14.73	139.34	9.52	18.41	7.60	7.50	1.84	75.51	1.32	18.41	7.50	7.10	7.37	132.90	5.33	18.41	8.40	7.10	23.94	348.45	15.48
10-Ago	12:00 a.m.	6:00 a.m.	18.78	5.40	5.15	4.69	144.04	4.63	18.78	5.15	5.12	0.56	76.07	0.58	18.78	5.12	3.80	24.79	157.69	25.78	18.78	5.40	3.80	30.05	378.49	29.63
	6:00 a.m.	12:00 p.m.	19.03	3.91	3.60	5.90	149.94	7.93	19.03	3.60	3.57	0.57	76.64	0.83	19.03	3.57	3.50	1.33	159.02	1.96	19.03	3.91	3.50	7.80	386.30	10.49
	12:00 p.m.	6:00 p.m.	4.99	11.62	11.02	2.98	152.92	5.14	4.99	11.02	11.11	-0.48	76.16	-0.87	4.99	11.11	8.41	13.49	172.51	24.33	4.99	11.62	8.41	15.99	402.29	27.60
	6:00 p.m.	12:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	152.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	76.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	172.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	402.29	0.00

Fuente: Elaboración propia

En estas tablas se observa la precipitación del metal disuelto como es el Zn, teniendo como resultado entre **0,10 a 1,4** mg/l esto es muy relevante ya que a un inicio como cabeza se encontró por encima de 0,63 a 2,47mg/l.

Tabla N° 4.14: Balance del Circuito Cobre.

BALANCE CIRCUITO DE ADSORCION Cu																									
Fecha	Hora	COLUMNA N° 1						COLUMNA N° 2						COLUMNA N° 3						CIRCUITO TOTAL DE ADSORCION					
		Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia
		m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	ml/l	ml/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%
5-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	3.68	0.44	0.12	1.18	1.18	72.73	3.68	0.12	0.11	0.04	0.04	8.33	3.68	0.11	0.10	0.04	0.04	9.09	3.68	0.44	0.10	1.25	1.25	77.27
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	6.78	0.12	0.11	0.07	1.25	8.33	6.78	0.11	0.10	0.07	0.10	9.09	6.78	0.10	0.10	0.00	0.04	0.00	6.78	0.12	0.10	0.14	1.39	16.67
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	21.97	0.09	0.08	0.22	1.47	11.11	21.97	0.08	0.07	0.22	0.32	12.50	21.97	0.07	0.06	0.22	0.26	14.29	21.97	0.09	0.06	0.66	2.05	33.33
6-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	21.60	0.09	0.08	0.22	1.68	11.11	21.60	0.08	0.07	0.22	0.54	12.50	21.60	0.07	0.06	0.22	0.47	14.29	21.60	0.09	0.06	0.65	2.69	33.33
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	9.89	0.09	0.08	0.10	1.78	11.11	9.89	0.08	0.07	0.10	0.64	12.50	9.89	0.07	0.06	0.10	0.57	14.29	9.89	0.09	0.06	0.30	2.99	33.33
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	8.48	0.49	0.09	3.39	5.17	81.63	8.48	0.09	0.08	0.08	0.72	11.11	8.48	0.08	0.07	0.08	0.66	12.50	8.48	0.49	0.07	3.56	6.55	85.71
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	19.61	0.06	0.06	0.00	5.17	0.00	19.61	0.06	0.06	0.00	0.72	0.00	19.61	0.06	0.06	0.00	0.66	0.00	19.61	0.06	0.06	0.00	6.55	0.00
7-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	30.13	0.09	0.08	0.30	5.47	11.11	30.13	0.08	0.07	0.30	1.03	12.50	30.13	0.07	0.07	0.00	0.66	0.00	30.13	0.09	0.07	0.60	7.15	22.22
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	9.89	0.09	0.08	0.10	5.57	11.11	9.89	0.08	0.07	0.10	1.12	12.50	9.89	0.07	0.07	0.00	0.66	0.00	9.89	0.09	0.07	0.20	7.35	22.22
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	14.47	0.10	0.07	0.43	6.01	30.00	14.47	0.07	0.07	0.00	1.12	0.00	14.47	0.07	0.05	0.29	0.95	28.57	14.47	0.10	0.05	0.72	8.08	50.00
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	13.87	0.07	0.07	0.00	6.01	0.00	13.87	0.07	0.06	0.14	1.26	14.29	13.87	0.06	0.05	0.14	1.08	16.67	13.87	0.07	0.05	0.28	8.35	28.57
8-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	23.93	0.06	0.06	0.00	6.01	0.00	23.93	0.06	0.05	0.24	1.50	16.67	23.93	0.05	0.05	0.00	1.08	0.00	23.93	0.06	0.05	0.24	8.59	16.67
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	22.79	0.06	0.05	0.23	6.23	16.67	22.79	0.05	0.05	0.00	1.50	0.00	22.79	0.05	0.05	0.00	1.08	0.00	22.79	0.06	0.05	0.23	8.82	16.67
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	9.54	0.07	0.07	0.00	6.23	0.00	9.54	0.07	0.07	0.00	1.50	0.00	9.54	0.07	0.07	0.00	1.08	0.00	9.54	0.07	0.07	0.00	8.82	0.00
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	18.76	0.08	0.07	0.19	6.42	12.50	18.76	0.07	0.06	0.19	1.69	14.29	18.76	0.06	0.05	0.19	1.27	16.67	18.76	0.08	0.05	0.56	9.38	37.50
9-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	18.00	0.07	0.07	0.00	6.42	0.00	18.00	0.07	0.07	0.00	1.69	0.00	18.00	0.07	0.07	0.00	1.27	0.00	18.00	0.07	0.07	0.00	9.38	0.00
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	17.43	0.07	0.05	0.35	6.77	28.57	17.43	0.05	0.04	0.17	1.86	20.00	17.43	0.04	0.04	0.00	1.27	0.00	17.43	0.07	0.04	0.52	9.91	42.86
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	19.57	0.08	0.08	0.00	6.77	0.00	19.57	0.08	0.07	0.20	2.06	12.50	19.57	0.07	0.06	0.20	1.47	14.29	19.57	0.08	0.06	0.39	10.30	25.00
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	18.41	0.05	0.05	0.00	6.77	0.00	18.41	0.05	0.05	0.00	2.06	0.00	18.41	0.05	0.05	0.00	1.47	0.00	18.41	0.05	0.05	0.00	10.30	0.00
10-Ago	12:00 a.m. - 6:00 a.m.	18.78	0.05	0.05	0.00	6.77	0.00	18.78	0.05	0.04	0.19	2.25	20.00	18.78	0.04	0.04	0.00	1.47	0.00	18.78	0.05	0.04	0.19	10.49	20.00
	6:00 a.m. - 12:00 p.m.	19.03	0.06	0.05	0.19	6.96	16.67	19.03	0.05	0.05	0.00	2.25	0.00	19.03	0.05	0.05	0.00	1.47	0.00	19.03	0.06	0.05	0.19	10.68	16.67
	12:00 p.m. - 6:00 p.m.	4.99	0.19	0.20	-0.06	6.90	-6.79	4.99	0.20	0.16	0.20	2.45	19.92	4.99	0.16	0.18	-0.12	1.34	-15.50	4.99	0.19	0.18	0.01	10.69	1.23
	6:00 p.m. - 12:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	6.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.69	0.00

Fuente: Elaboración propia

En estas tablas se observa la precipitación del metal disuelto como es el Cu, siendo como último resultado entre **0,10 a 0,18 mg/l** esto no es muy relevante ya que se encuentra controlado.

Tabla N° 4.3.6. Balance del Circuito Fierro.

BALANCE CIRCUITO DE ADSORCION Fe																									
Fecha	Hora	COLUMNA N° 1						COLUMNA N° 2						COLUMNA N° 3						CIRCUITO TOTAL DE ADSORCION					
		Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia	Volumen	IN	OUT	PARCIAL	Acum.	Eficiencia
		m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%	m ³	mg/l	mg/l	gr	gr	%
5-Ago	12:00 a.m. 6:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	6:00 a.m. 12:00 p.m.	3.68	0.22	0.18	0.15	0.15	18.18	3.68	0.18	0.17	0.04	0.04	5.56	3.68	0.17	0.13	0.15	0.15	23.53	3.68	0.17	0.09	0.27	0.42	30.77
	12:00 p.m. 6:00 p.m.	6.78	0.18	0.17	0.07	0.22	5.56	6.78	0.17	0.13	0.27	0.31	23.53	6.78	0.13	0.09	0.27	0.42	30.77	6.78	0.18	0.09	0.61	0.94	50.00
	6:00 p.m. 12:00 a.m.	21.97	4.29	0.38	85.91	86.12	91.14	21.97	0.38	0.25	2.86	3.16	34.21	21.97	0.25	0.12	2.86	3.27	52.00	21.97	4.29	0.12	91.62	92.56	97.20
6-Ago	12:00 a.m. 6:00 a.m.	21.60	1.39	0.38	21.81	107.93	72.66	21.60	0.38	0.25	2.81	5.97	34.21	21.60	0.25	0.11	3.02	6.30	56.00	21.60	1.39	0.11	27.64	120.21	92.09
	6:00 a.m. 12:00 p.m.	9.89	1.39	0.38	9.99	117.92	72.66	9.89	0.38	0.25	1.29	7.26	34.21	9.89	0.25	0.11	1.38	7.68	56.00	9.89	1.39	0.11	12.66	132.86	92.09
	12:00 p.m. 6:00 p.m.	8.48	0.28	0.26	0.17	118.09	7.14	8.48	0.26	0.23	0.25	7.51	11.54	8.48	0.23	0.16	0.59	8.28	30.43	8.48	0.28	0.16	1.02	133.88	42.86
	6:00 p.m. 12:00 a.m.	19.61	0.15	0.11	0.78	118.88	26.67	19.61	0.11	0.10	0.20	7.71	9.09	19.61	0.10	0.10	0.00	8.28	0.00	19.61	0.15	0.10	0.98	134.86	33.33
7-Ago	12:00 a.m. 6:00 a.m.	30.13	0.25	0.21	1.21	120.08	16.00	30.13	0.21	0.16	1.51	9.21	23.81	30.13	0.16	0.13	0.90	9.18	18.75	30.13	0.25	0.13	3.62	138.48	48.00
	6:00 a.m. 12:00 p.m.	9.89	0.25	0.21	0.40	120.48	16.00	9.89	0.21	0.16	0.49	9.71	23.81	9.89	0.16	0.13	0.30	9.48	18.75	9.89	0.25	0.13	1.19	139.66	48.00
	12:00 p.m. 6:00 p.m.	14.47	0.13	0.12	0.14	120.62	7.69	14.47	0.12	0.10	0.29	10.00	16.67	14.47	0.10	0.08	0.29	9.77	20.00	14.47	0.13	0.08	0.72	140.39	38.46
	6:00 p.m. 12:00 a.m.	13.87	0.30	0.21	1.25	121.87	30.00	13.87	0.21	0.20	0.14	10.14	4.76	13.87	0.20	0.18	0.28	10.04	10.00	13.87	0.30	0.18	1.66	142.05	40.00
8-Ago	12:00 a.m. 6:00 a.m.	23.93	0.29	0.22	1.67	123.55	24.14	23.93	0.22	0.18	0.96	11.09	18.18	23.93	0.18	0.13	1.20	11.24	27.78	23.93	0.29	0.13	3.83	145.88	55.17
	6:00 a.m. 12:00 p.m.	22.79	0.12	0.12	0.00	123.55	0.00	22.79	0.12	0.11	0.23	11.32	8.33	22.79	0.11	0.11	0.00	11.24	0.00	22.79	0.12	0.11	0.23	146.11	8.33
	12:00 p.m. 6:00 p.m.	9.54	0.10	0.09	0.10	123.64	10.00	9.54	0.09	0.09	0.00	11.32	0.00	9.54	0.09	0.07	0.19	11.43	22.22	9.54	0.10	0.07	0.29	146.40	30.00
	6:00 p.m. 12:00 a.m.	18.76	0.18	0.17	0.19	123.83	5.56	18.76	0.17	0.10	1.31	12.64	41.18	18.76	0.10	0.09	0.19	11.62	10.00	18.76	0.18	0.09	1.69	148.08	50.00
9-Ago	12:00 a.m. 6:00 a.m.	18.00	0.18	0.16	0.36	124.19	11.11	18.00	0.16	0.15	0.18	12.82	6.25	18.00	0.15	0.14	0.18	11.80	6.67	18.00	0.18	0.14	0.72	148.80	22.22
	6:00 a.m. 12:00 p.m.	17.43	0.10	0.10	0.00	124.19	0.00	17.43	0.10	0.08	0.35	13.16	20.00	17.43	0.08	0.08	0.00	11.80	0.00	17.43	0.10	0.08	0.35	149.15	20.00
	12:00 p.m. 6:00 p.m.	19.57	0.15	0.14	0.20	124.39	6.67	19.57	0.14	0.09	0.98	14.14	35.71	19.57	0.09	0.09	0.00	11.80	0.00	19.57	0.15	0.09	1.17	150.33	40.00
	6:00 p.m. 12:00 a.m.	18.41	0.29	0.11	3.31	127.70	62.07	18.41	0.11	0.10	0.18	14.33	9.09	18.41	0.10	0.06	0.74	12.54	40.00	18.41	0.29	0.06	4.24	154.56	79.31
10-Ago	12:00 a.m. 6:00 a.m.	18.78	0.33	0.10	4.32	132.02	69.70	18.78	0.10	0.10	0.00	14.33	0.00	18.78	0.10	0.07	0.56	13.10	30.00	18.78	0.33	0.07	4.88	159.44	78.79
	6:00 a.m. 12:00 p.m.	19.03	0.17	0.10	1.33	133.35	41.18	19.03	0.10	0.06	0.76	15.09	40.00	19.03	0.06	0.06	0.00	13.10	0.00	19.03	0.17	0.06	2.09	161.54	64.71
	12:00 p.m. 6:00 p.m.	4.99	1.00	0.61	1.96	135.31	39.19	4.99	0.61	0.49	0.60	15.69	19.81	4.99	0.49	0.38	0.55	13.65	22.49	4.99	1.00	0.38	3.11	164.65	62.20
	6:00 p.m. 12:00 a.m.	0.00	0.00	0.00	0.00	135.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	164.65	0.00

Fuente: Elaboración propia

En estas tablas se observa la precipitación del metal disuelto como es el Fe, siendo como último resultado entre **0,13 a 0.38** mg/lit esto no es muy relevante ya que se encuentra controlado.

4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS

NOMBRE DEL PARAMETRO: CADMIO

La Guía Canadiense de la Calidad del Agua, establece para aguas de riego una concentración para el Cadmio de 0,01 mg/l.

La FAO, establece una concentración máxima de 0,01 mg/l para el Cadmio, en aguas destinadas al Riego.

La Ley General de Aguas establece como valor límite de concentración de 0,05 mg/l, para el cadmio en Aguas destinadas de riego de vegetales de Consumo Crudo y bebida de animales, correspondiente a la clase III.

Método de Análisis: Espectrofotometría de Absorción Atómica.

En las pruebas de la planta piloto obtenemos 0,02 a 0,05 mg/lit, que está muy cerca a los parámetros a la FAO y la Guía Canadiense en la calidad de agua al riego, en la Ley General de Aguas establece 0,05 mg/l, donde si estamos en el límite.

NOMBRE DEL PARAMETRO: MANGANESO

La Guía Canadiense de la Calidad del Agua, establece para las aguas destinadas al riego una concentración de 0,2 mg/l para el Manganeseo.

La FAO, establece al Manganeseo un valor de 0,20 mg/l de concentración máxima en aguas destinadas al riego.

La Ley General de Aguas establece valor límite de 0,5 mg/l, para Aguas de riego de vegetales de Consumo Crudo y bebida de animales, correspondiente a la clase III.

Método de Análisis: Espectrofotometría de Absorción Atómica.

En las pruebas de la planta piloto obtenemos 0,24 a 0,75 mg/lit, que está muy cerca a los parámetros a la FAO y la Guía Canadiense en la calidad de agua al riego, en la Ley General de Aguas establece 0,5 mg/l, donde si estamos casi en el límite.

NOMBRE DEL PARAMETRO: PLOMO

La Guía Canadiense de la Calidad del Agua, establece una concentración de Plomo de 0,2 mg/l para aguas destinadas al riego.

La FAO, establece una concentración de 5 mg/l de Plomo para aguas destinadas al riego.

La Ley General de Aguas establece para el Plomo un valor de concentración, de 0,1 mg/l para Aguas destinadas al riego de vegetales de Consumo Crudo y bebida de animales, correspondiente a la clase III.

Método de Análisis Espectrofotometría de Absorción Atómica.

En las pruebas de la planta piloto obtenemos 0,07 a 0,41 mg/lit, que está muy cerca a los parámetros a la FAO y la Guía Canadiense en la calidad de agua al riego, en la Ley General de Aguas establece 0,1 mg/l, donde si estamos casi en el límite.

NOMBRE DEL PARAMETRO: ZINC

La Guía Canadiense de la Calidad del Agua, establece para aguas de riego una concentración de 1 mg/l para el Zinc en suelos con pH < 6,5 y 5 mg/l en suelos con pH > 6,5.

La FAO, establece una concentración de 2 mg/l de Zinc, para aguas destinadas al riego.

La Ley General de Aguas establece para el Zinc una concentración, de 25 mg/l para Aguas destinadas al riego de vegetales de Consumo Crudo y bebida de animales, correspondiente a la clase III.

Método de Análisis: Espectrofotometría de Absorción Atómica.

En las pruebas de la planta piloto obtenemos 0,10 a 1,4 mg/lit, que está muy cerca a los parámetros a la FAO y la Guía Canadiense en la calidad de agua al riego, en la Ley General de Aguas establece 25 mg/l, donde si estamos en el límite.

NOMBRE DEL PARAMETRO: COBRE

La Guía Canadiense de la Calidad del Agua, establece para las aguas destinadas al riego una concentración de Cobre de 0,2 mg/l para cultivos sensibles y 1 mg/l para cultivos tolerantes.

La FAO, establece una concentración de 0,2 mg/l de Cobre para aguas destinadas al riego.

La Ley General de Aguas establece para el Cobre un valor límite de concentración, de 0,5 mg/l para Aguas destinadas al riego de vegetales de Consumo Crudo y bebida de animales, correspondiente a la clase III.

Método de Análisis: Espectrofotometría de Absorción Atómica

En las pruebas de la planta piloto obtenemos 0,10 a 0,18 mg/lit, que está dentro de los parámetros a la FAO y la Guía Canadiense en la calidad de agua al

riego, en la Ley General de Aguas establece 0,5 mg/l, donde si estamos en el límite.

NOMBRE DEL PARAMETRO: HIERRO

La Guía Canadiense de la Calidad del Agua, establece como valor al Hierro de 5,00 mg/l de concentración de aguas destinadas al riego.

La FAO, establece al Hierro un valor de 5,00 mg/l de concentración máxima en aguas destinadas al riego.

La Ley General de Aguas establece valor límite de 1,00 mg/l al Hierro, para Aguas de riego de vegetales de Consumo Crudo y bebida de animales, correspondiente a la clase III.

Método de Análisis: Espectrofotometría de Absorción Atómica.

En las pruebas de la planta piloto obtenemos 0,13 a 0,38 mg/l, que está dentro de los parámetros a la FAO y la Guía Canadiense en la calidad de agua al riego, en la Ley General de Aguas establece 1,0 mg/l, donde si estamos dentro del límite.

CONCLUSIONES

1. En la planta piloto instalada se está tratando las aguas ácidas que han sido bombeadas desde las operaciones mineras, metalúrgicas. En el cual se logra captar los metales disueltos y obtener agua para riego.
2. En la prueba de hipótesis se presenta los parámetros de control tomando en cuenta la Guía Canadiense, FAO y la Ley General de Aguas, donde nuestros resultados están cerca al Límite Máximo Permisible.
3. Durante la prueba realizada en la planta piloto el flujo acumulado fue de 355,51 m³, y se ha ido monitoreando de acuerdo a lo programado.
4. Para el tratamiento de las aguas ácidas se hecho uso de carbonato de calcio, y carbón activado en las columnas de la planta piloto.

RECOMENDACIONES

1. Se debe continuar con la investigación para seguir disminuyendo la presencia de metales disueltos en las aguas para riego y bebida de animales.
2. Se debe de utilizar otros elementos químicos para disminuir la presencia de metales disueltos.
3. Los resultados obtenidos hasta el momento son aceptables y se está a la espera de una resolución por parte de los organismos de ANA, Ministerio del Medio Ambiente.
4. Se debe de implementar en las empresas mineras este tipo de tratamiento de aguas y así evitar la contaminación de los riachuelos, ríos, lagunas y el mar.

BIBLIOGRAFÍA

1. Clarke. Lee B. (1995). Coal mining and water quality, IEA Coal Reserch, IEACR/80, July.
2. Hedin, R. S., and Nairn, R. W. (1993), Contaminant removal capabilities of wetlands constructed to treat coal mine drainage. En: G. A. Moshiri (ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, CRC Press, Boca Raton.
3. Hedin, R.S., Watzlaf, G.R. and Nairn, R.W. (1994), Passive treatment of acid mine drainage with limestone. *Journal of Environmental Quality*.
4. Iribar, V., Izco, F., Tames, P., Da Silva, A. y Antigüedad, I. (1999), Use a tailings pond as an aerobic wetland at the closed Troya mine (Guipúzcoa, Northern Spain). IMWA Congress, *Mine, Water & Environment*, Sevilla.
5. Nordstrom D.K. and Alpers C.N. (1999), Geochemistry of acid mine waters. En: Plumlee, G.S., Logsdon, M.J. (eds), *The environmental geochemistry of mineral deposits*. Reviews in Economic Geology, Society of Economic Geologists, Littleton, CO. USA.
6. Ordóñez, A., Loredó, J. y Pendás, F. (1999), A successive alkalinity producing system (RAPS) as operational unit in a hybrid passive treatment system for acid mine drainage. IMWA Congress, *Mine, Water & Environment*, Sevilla.

7. Ordóñez A. A., (1999), Tesis Doctoral: Sistema de Tratamiento Pasivo para Aguas Ácidas de Mina, Oviedo, España.
8. Sobolewski, A. (1996), Metal species indicate the potential of constructed wetlands for long-term treatment of mine drainage. *Ecological Engineering*.
9. Summers L Bonelli J. (1997). Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas, Lima, Perú.
10. Watzlaf, G. (1997), Passive treatment acid mine drainage in down-flow limestone systems. U.S. *Department of Energy Technology Center*, Pittsburgh.