

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina,
mediante neutralización activo con lechada de cal de la Unidad Minera
Arasi – Puno

Por:

Cynthia Candy Jimenez Huallpa

Asesor:

Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga

Lima, junio de 2017

Como citar

Estilo APA

Jimenez C. (2017). Eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización activo con lechada de cal de la Unidad Minera Arasi – Puno (Tesis de pregrado). Universidad Peruana Unión, Lima.

Estilo Vancouver

Jimenez C. Eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización activo con lechada de cal de la Unidad Minera Arasi – Puno (Tesis de pregrado). Lima: Universidad Peruana Unión, 2017.

Estilo Chicago

Jimenez Huallpa, Cynthia. 2017. Eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización activo con lechada de cal de la Unidad Minera Arasi – Puno. Tesis de licenciatura. Universidad Peruana Unión.

Ficha catalográfica elaborada por el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI) de la UPeU

| | |
|-------------|--|
| TIAm | Jimenez Huallpa, Cynthia Candy |
| 2 | Eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante |
| J54 | neutralización activo con lechada de cal de la Unidad Minera Arasi – Puno. |
| 2017 | Autora: Cynthia Candy Jimenez Huallpa; Asesora: Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga -- Lima, 2017 178 páginas: anexos, figuras, tablas. |
| | Tesis (Licenciatura)--Universidad Peruana Unión. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. E.P. de Ingeniería Ambiental, 2017. Incluye bibliografía y resumen. Campo del conocimiento: Ingeniería Ambiental. |
| | 1. Drenaje ácido. 2. Neutralización con lechada de cal. 3. Eficiencia de remoción. |

**DECLARACIÓN JURADA
DE AUTORIA DEL INFORME DE TESIS**

Ing. Milda Amparo Cruz Huaranga de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA, MEDIANTE NEUTRALIZACIÓN ACTIVO CON LECHADA DE CAL DE LA UNIDAD MINERA ARASI – PUNO" constituye la memoria que presenta la Bachiller Cynthia Candy Jimenez Huallpa para aspirar al título de Profesional de Ingeniero Ambiental ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en Lima, a los *(fecha)* del año...



Ing. Milda Amparo Cruz Huaranga

“Eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina,
mediante neutralización activo con lechada de cal de la Unidad Minera
Arasi - Puno”

TESIS

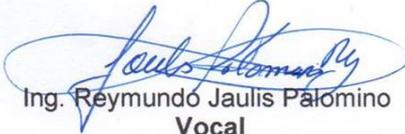
Presentada para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

JURADO DE CALIFICADOR


Mg. Iliana del Carmen Gutiérrez Rodríguez
Presidenta


MSc. Natalí Carbo Bustinza
Secretaria


Ing. Ferret Canaza Rojas
Vocal


Ing. Reymundo Jaulis Palomino
Vocal


Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga
Asesora

Lima, 09 de junio de 2017

**“No temas, que yo estoy contigo, No desmayes, que Yo Soy tu Dios que te fortalezco.
Siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia”.**

Isaías 41:10

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Gloria y Wilfredo, quienes me enseñaron que el camino al éxito es a través de la perseverancia constante.

A mis hermanos, y,

A todas las personas que con sus ánimos y consejos hicieron que no desista de mi objetivo propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento de manera especial a Dios por siempre bendecir mi camino y darme fortaleza para no declinar antes las adversidades.

Agradezco infinitamente a mis padres, que han sido los pilares fundamentales en mi formación como profesional, por brindarme la confianza, consejos, oportunidad y recursos para lograrlo. A mis hermanos Chris, Ericka y Jefferson, por su paciencia y apoyo incondicional durante toda esta etapa de la tesis.

De la misma manera, agradezco a mi asesora, Milda Cruz Huaranga, por ser quien me ha guiado en este proceso de investigación. Asimismo, a la profesora Gina Tito y Mg. Natalí Carbo por su apoyo y amistad desde los inicios de mi carrera.

Finalmente, agradecer a mi amigos Miriam, Jennza y Dean , que durante todo el tiempo que ha durado este trabajo de investigación, se han preocupado y a riesgo de caer pesados, me han hecho la famosa preguntita...“¿cuando terminas la Tesis?”, para la cual por fin tengo respuesta.

INDICE GENERAL

| | Pág. |
|---|------|
| RESUMEN | xix |
| ABSTRACT | xx |
| CAPITULO I..... | 21 |
| INTRODUCCIÓN..... | 21 |
| 1.1. Identificación del problema | 21 |
| 1.2. Justificación de la investigación | 24 |
| 1.3. Objetivos..... | 26 |
| CAPITULO II..... | 27 |
| REVISION DE LITERATURA | 27 |
| 2.1. Antecedentes | 27 |
| 2.2. Drenaje Ácido de Mina (DAM)..... | 30 |
| 2.2.1. Clases de Drenaje de Minas | 31 |
| 2.2.2. Reacciones químicas y biológicas relacionadas con la generación Ácida | 33 |
| 2.2.3. Etapas de formación de aguas ácidas | 36 |
| 2.2.4. Factores que intervienen en la formación de aguas ácidas..... | 39 |
| 2.3. Control del drenaje ácido de minas..... | 40 |
| 2.4. Tratamiento Químico Activo de Drenaje Acido | 44 |
| 2.5. Problemática de los Drenajes Ácidos de Mina | 55 |
| 2.6. Marco Legal | 60 |

| | |
|---|-----|
| 2.7. Aspectos generales del proyecto de estudio..... | 64 |
| CAPITULO III..... | 72 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 72 |
| 3.1. Lugar de ejecución..... | 72 |
| 3.2. Materiales e Insumos | 73 |
| 3.3. Variables de Estudio | 74 |
| 3.4. Procedimiento | 74 |
| 3.5. Tipo y Diseño de la investigación..... | 81 |
| 3.6. Formulación de Hipótesis | 82 |
| 3.7. Análisis de Datos | 82 |
| CAPITULO IV | 84 |
| RESULTADOS Y DISCUSIONES | 84 |
| 4.1. Determinación del caudal | 84 |
| 4.2. Ensayos de Laboratorio..... | 84 |
| 4.3. Análisis de resultados Pre – Post Tratamiento..... | 92 |
| 4.3.1. Parámetros Físico químicos | 93 |
| 4.3.2. Parámetros Inorgánicos | 104 |
| CAPITULO V..... | 162 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 162 |
| 5.1. Conclusiones | 162 |
| 5.2. Recomendaciones | 163 |
| BIBLIOGRAFIA | 164 |

INDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Métodos preventivos de formación de Drenaje Ácido de Mina..... | 43 |
| Tabla 2. Compuesto químico utilizado en el tratamiento de drenaje ácido de mina | 46 |
| Tabla 3. Características típicas del drenaje ácido de mina | 59 |
| Tabla 4. Categoría 3: Riego de vegetales y bebidas de animales..... | 63 |
| Tabla 5. Vías de acceso del Proyecto – Ruta A y Ruta B..... | 65 |
| Tabla 6. Cuadro de Distancias a los Centros Poblados más Cercanos. | 66 |
| Tabla 7. Coordenadas geograficas de la zona de estudio. | 73 |
| Tabla 8. Cantidad de caudal del drenaje ácido. | 84 |
| Tabla 9. Resultados de análisis físico – Químicos | 86 |
| Tabla 10. Resultados de los análisis químicos de metales pesados..... | 86 |
| Tabla 11. Resultados de parámetros físico – químicos. | 88 |
| Tabla 12. Resultados de parámetros inorgánicos utilizando lechada de cal..... | 88 |
| Tabla 13. Comparación de los parámetros inorgánicos con ECA de Agua y LMP´s. | 90 |
| Tabla 14. Comparación de los parámetros inorgánicos con ECA de Agua y LMP´s. | 90 |
| Tabla 15. Comparación de los parámetros inorgánicos con ECA de Agua y LMP´s. | 91 |
| Tabla 16. Comparación de los parámetros inorgánicos con ECA de Agua y LMP´s. | 91 |
| Tabla 17. Resultados de parámetros físico-químicos pre y post Tratamiento..... | 92 |
| Tabla 18. Resultados de parámetros inorgánicos Pre y Post tratamiento..... | 93 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 19. Prueba de normalidad de Conductividad pre y post tratamiento..... | 95 |
| Tabla 20. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de Conductividad..... | 96 |
| Tabla 21. Prueba de normalidad de pH pre y post tratamiento. | 99 |
| Tabla 22. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de pH. | 100 |
| Tabla 23. Prueba de normalidad de oxígeno disuelto pre y post tratamiento..... | 103 |
| Tabla 24. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de oxígeno disuelto..... | 104 |
| Tabla 25. Prueba de normalidad de aluminio pre y post tratamiento. | 106 |
| Tabla 26. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de aluminio..... | 107 |
| Tabla 27. Prueba de normalidad de arsénico pre y post tratamiento..... | 110 |
| Tabla 28. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de arsénico..... | 111 |
| Tabla 29. Prueba de normalidad de berilio pre y post tratamiento..... | 114 |
| Tabla 30. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de berilio..... | 115 |
| Tabla 31. Prueba de normalidad de boro pre y post tratamiento..... | 117 |
| Tabla 32. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de boro..... | 118 |
| Tabla 33. Prueba de normalidad de cadmio pre y post tratamiento..... | 121 |
| Tabla 34. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de cadmio. | 122 |
| Tabla 35. Prueba de normalidad de cobalto pre y post tratamiento..... | 125 |
| Tabla 36. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de cobalto..... | 126 |
| Tabla 37. Prueba de normalidad de cobre pre y post tratamiento..... | 129 |
| Tabla 38. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de cobre..... | 130 |
| Tabla 39. Prueba de normalidad de cromo pre y post tratamiento..... | 133 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 40. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de cromo..... | 134 |
| Tabla 41. Prueba de normalidad de hierro pre y post tratamiento..... | 136 |
| Tabla 42. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de hierro..... | 137 |
| Tabla 43. Prueba de normalidad de magnesio pre y post tratamiento..... | 140 |
| Tabla 44. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de magnesio..... | 141 |
| Tabla 45. Prueba de normalidad de manganeso pre y post tratamiento..... | 144 |
| Tabla 46. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de manganeso..... | 145 |
| Tabla 47. Prueba de normalidad de níquel pre y post tratamiento..... | 148 |
| Tabla 48. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de níquel..... | 149 |
| Tabla 49. Prueba de normalidad de plomo pre y post tratamiento..... | 152 |
| Tabla 50. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de plomo..... | 153 |
| Tabla 51. Prueba de normalidad de selenio pre y post tratamiento..... | 155 |
| Tabla 52. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de selenio..... | 156 |
| Tabla 53. Prueba de normalidad de zinc pre y post tratamiento..... | 159 |
| Tabla 54. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de zinc..... | 160 |

INDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Drenaje ácido de mina..... | 31 |
| Figura 2. Oxidación de la pirita..... | 34 |
| Figura 3. Etapas de generación de drenaje ácido..... | 38 |
| Figura 4. Ilustración esquemática de los factores que afectan la oxidación de los sulfuros y modifican el drenaje de las minas durante el transporte | 40 |
| Figura 5. Ejemplos de estrategias para prevenir o minimizar la generación de AMD y diferentes técnicas de tratamiento para agua ácidas. | 41 |
| Figura 6. Efecto del pH sobre la solubilidad relativa de los iones metálicos desnudos (acuosos) en equilibrio con sus correspondientes especies de hidróxido metálico (sólido).. .. | 53 |
| Figura 7. Representaciones esquemáticas de los efectos ambientales del drenaje ácido. ... | 57 |
| Figura 8. Los principales efectos del drenaje ácido sobre los sistemas lóticos. | 58 |
| Figura 9. Muestras de Suelo y Roca..... | 68 |
| Figura 10. Trabajos con perforación diamantina..... | 68 |
| Figura 11. Perforación de taladros, colocación de agentes detonadores. | 69 |
| Figura 12. Carguío de material..... | 69 |
| Figura 13. Transporte de mineral o desmonte..... | 70 |
| Figura 14. Depósito de Desmonte..... | 70 |
| Figura 15. Planta Merrill Crowe..... | 71 |
| Figura 16. Mapa de ubicación de la zona de estudio..... | 72 |

| | |
|---|-----|
| Figura 17. Medición de caudal de efluente ácido..... | 76 |
| Figura 18. Actual sistema de tratamiento de efluente ácido utilizando cal viva (CaO). ... | 79 |
| Figura 19. Adecuación del tratamiento activo con lechada de Cal (CaOH ₂) al actual sistema de tratamiento con cal viva (CaO)..... | 80 |
| Figura 20. Comparación del parámetro Conductividad antes y después del tratamiento con norma..... | 94 |
| Figura 21. Comparación del parámetro Conductividad antes y después del tratamiento con ECA de agua..... | 98 |
| Figura 22. Comparación del parámetro Conductividad antes y después del tratamiento con LMP's. | 98 |
| Figura 23. Comparación del parámetro oxígeno disuelto antes y después del tratamiento con norma. | 102 |
| Figura 24. Comparación del parámetro aluminio antes y después del tratamiento con norma. | 105 |
| Figura 25. Comparación del parámetro arsénico antes y después del tratamiento con ECA de agua..... | 109 |
| Figura 26. Comparación del parámetro arsénico antes y después del tratamiento con LMP's. | 109 |
| Figura 27. Comparación del parámetro berilio antes y después del tratamiento con norma. | 113 |
| Figura 28. Comparación del parámetro boro antes y después del tratamiento con norma. | 116 |
| Figura 29. Comparación del parámetro cadmio antes y después del tratamiento con ECA de agua..... | 120 |
| Figura 30. Comparación del parámetro cadmio antes y después del tratamiento con LMP's. | 120 |

| | |
|--|-----|
| Figura 31. Comparación del parámetro cobalto antes y después del tratamiento con norma | 124 |
| Figura 32. Comparación del parámetro cobre antes y después del tratamiento con ECA de agua..... | 128 |
| Figura 33. Comparación del parámetro cobre antes y después del tratamiento con LMP's. | 128 |
| Figura 34. Comparación del parámetro cromo antes y después del tratamiento con ECA de agua..... | 132 |
| Figura 35. Comparación del parámetro hierro antes y después del tratamiento con norma. | 135 |
| Figura 36. Comparación del parámetro magnesio antes y después del tratamiento con norma..... | 139 |
| Figura 37. Comparación del parámetro manganeso antes y después del tratamiento con norma..... | 143 |
| Figura 38. Comparación del parámetro níquel antes y después del tratamiento con ECA de Agua..... | 146 |
| Figura 39. Comparación del parámetro níquel antes y después del tratamiento con LMP's. | 147 |
| Figura 40. Comparación del parámetro plomo antes y después del tratamiento con ECA de agua..... | 150 |
| Figura 41. Comparación del parámetro plomo antes y después del tratamiento con LMP's. | 151 |
| Figura 42. Comparación del parámetro selenio antes y después del tratamiento con norma. | 154 |
| Figura 43. Comparación del parámetro zinc antes y después del tratamiento con ECA de agua..... | 158 |

Figura 44. Comparación del parámetro zinc antes y después del tratamiento con LMP's.
..... 158

INDICE DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| Anexo 1. Ficha técnica de cal | 172 |
| Anexo 2. Resultado de ensayo de laboratorio | 177 |
| Anexo 3. Resultado de análisis pre y post tratamiento | 178 |

GLOSARIO

Drenaje ácido: Drenaje contaminado que resulta de la oxidación de minerales asociados, provenientes de las rocas sulfurosas cuando son expuestas al aire y al agua.

Contaminación del agua: Acumulación indeseable de sustancias organismos y cualquier forma de energía en un sistema hídrico.

Neutralización: Alcanzar el pH de materiales ácidos o bajar el pH de materiales alcalinos para llegar a valores cercanos al pH neutro a través de una reacción en que el ion hidrogeno de un ácido y el ion hidróxido de una base se combina para formar agua, siendo el otro producto una sal.

Oxidación de sulfuro: Oxidación exotérmica de sulfuro reducido químicamente a una forma parcialmente o completamente oxidada tal como sulfato (SO_4^{-2}). Un indicio de oxidación de sulfuro, es las concentraciones de sulfato elevadas en el drenaje del sitio minero.

Tratamiento Químico Activo: Proceso en el cual compuestos químicos o naturales son añadidos al drenaje contaminado para mejorar la calidad del agua. El control puede variar desde una serie de tratamiento relativamente simple a una planta de tratamiento computarizada sofisticadamente con múltiples aditivos y procesos de control y monitoreo detallados.

RESUMEN

El propósito de esta investigación es la eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización activo con lechada de Cal de la Unidad Minera Arasi – Puno, generado en el pie del Botadero Jessica. La investigación se realizó en cuatro etapas: primero se realizó la medición de caudal y la caracterización del agua ácida, la segunda etapa se realizó los ensayos de laboratorio con la neutralización con lechada de cal y análisis de los parámetros físico-químicos e inorgánicos del agua tratada obtenida de los ensayos de laboratorio, en tercer lugar la adecuación del tratamiento con lechada de cal al actual sistema de tratamiento, y por último la cuarta etapa es el análisis de los parámetros físico-químicos e inorgánicos a nivel de campo. Los resultados obtenidos en la remoción de metales pesados en el efluente a nivel campo a un pH de 8.1, C.E de 5.14 mS/cm y O.D de 5.54mg/l arroja resultados de remoción de 99.96% de Al, 0 % de As, 99.7% de Be, 99.8% de B, 98.9% de Cd, 99.9% de Co, 99.9% de Cu, 99.5% Cr, 99.98% de Fe, 83.5% de Mg, 98.7% de Mn, 99.9% de Ni, 0% de Pb, 0% de Se, y 99.95% de Zn. En conclusión, al neutralizar el drenaje ácido con lechada de cal existe una eficiencia de remoción considerable de los parámetros físico químico e inorgánico.

Palabras Clave: drenaje ácido, neutralización con lechada de cal, eficiencia de remoción.

ABSTRACT

The purpose of this research is the efficiency in the removal of the treatment of acidic waters of mine, by means of active neutralization with lime sludge from the Arasi - Puno Mining Unit, generated at the foot of the Jessica Dump. The research was carried out in four stages: first the measurement of flow and the characterization of the acid water, the second stage was carried out the laboratory tests with the neutralization with lime slurry and analysis of the physical-chemical and inorganic parameters of the water Treated laboratory tests, thirdly the adequacy of the treatment with lime slurry to the current treatment system, and finally the fourth stage is the analysis of the physical-chemical and inorganic parameters at the field level. The results obtained in the removal of heavy metals in the field level effluent at a pH of 8.1, EC of 5.14 mS / cm and OD of 5.54 mg / l yield 99.96% Al, 0% As, 99.7 % Of Be, 99.8% of B, 98.9% of Cd, 99.9% of Co, 99.9% of Cu, 99.5% Cr, 99.98% of Fe, 83.5% of Mg, 98.7% of Mn, 99.9% of Ni, Pb, 0% Se, and 99.95% Zn. In conclusion, when neutralizing the acid drainage with lime slurry there is a considerable removal efficiency of the chemical and inorganic physical parameters.

Keywords: acid drainage, neutralization with lime slurry, removal efficiency.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Identificación del problema

La minería, a través de los siglos, ha formado parte de la historia y el desarrollo económico de los países. Sin embargo como cualquier actividad productiva ha venido generando enormes impactos ambientales. Uno de los principales problemas generado en la minería de metales y carbón es la generación de drenaje ácido de mina (Lottermoser, 2007), que se forma a partir de la oxidación de sulfuros metálicos en presencia de oxígeno atmosférico y agua (Lapakko, 2002).

Una vez generado el drenaje ácido de mina, el proceso de formación es cíclico e irreversible y perdura por años o décadas hasta tanto no sea eliminado uno de los principales agentes que lo causan (Chaparro, 2015), así mismo es difícil y costoso su control, los efectos de la contaminación son a largo plazo (Nina, 2008), y afectan a las aguas superficiales y subterráneas por la disminución del pH, la disolución de metales pesados en el agua y por la presencia de partículas en suspensión que se acumulan y sedimentan (Jaramillo & Flores, 2012). En muchos casos, estos impactos han dado como resultado miles de hectáreas pérdidas para la agricultura y la ganadería de las comunidades campesinas, pérdida de biodiversidad, impactos en la salud (morbilidad, mortalidad) de los habitantes de las zonas mineras, y migración

forzada de comunidades (UNES 1999, citado por Flores López & Gonzalez Taboada, 2002). Además que imposibilita el uso de agua industrial, dado el carácter corrosivo que se presentan sobre estructuras metálicas y de hormigón (Aduvire, 2006).

La prevención y remediación del drenaje ácido es más complicada una vez cerrada la mina que cuando está en actividad, lo que implica altos costos y dificultades técnicas para la recuperación de los recursos deteriorados (principalmente agua y suelo) (Kirschbaum & Murray, 1997).

En el Perú el subsector minero aparece reiteradamente como el sector industrial más contaminante de cuerpos de aguas. Se ha estimado que las actividades mineras y metalúrgicas en conjunto descargan anualmente más de 13 billones de metros cúbicos de efluentes en los cuerpos de agua del país (Banco Mundial 2000, citado por Balvín & Amezaga, 2006).

Existen distintos de casos de contaminación en nuestro país por las actividades mineras, así como la Bahía de Ite contaminado por el incremento de sólidos en suspensión y la presencia de metales pesados por la actividad de las minas de Toquepala y Cuajone, también el río San Juan y el lago Junín ha sido contaminado por los efluentes sin tratamiento de las mineras Volcan, El brocal y la compañía minera Aurex, provocando la eliminación completa de la vida acuática en el cuerpo de agua, finalmente la contaminación del río Yauli presenta niveles altos de metales pesados producto de las actividades del complejo metalúrgico de la Oroya (Balvín & Amezaga, 2006).

En el departamento de Puno, la principal contaminación de las aguas superficiales y subterráneas son afectados por la descarga de efluentes sin tratamiento de las mineras abandonadas y en actividad (Guerrero & Zavala, 2005). Los pobladores del distrito de Ocuwiri de la Provincia de Lampa no están exentos de la contaminación que ocasiona el vertimiento de las aguas ácidas de mina. Esta comunidad alberga una población grande y tienen como principal actividad al sector pecuario (camélidos y ovinos andinos); produciéndose un ingreso económico por la venta de la fibra y la lana de los animales, que son utilizados en la artesanía.

Actualmente la empresa minera Aruntani está aledaño a la localidad y se encuentran realizando actividades de explotación a tajo abierto para la producción de oro, sin embargo el depósito de desmonte, que se genera producto de la explotación, al estar expuesto a la acción del aire y agua genera drenaje ácido que no es tratado eficientemente, así mismo la empresa no está cumpliendo con los compromisos establecidos en el estudio de impacto ambiental para el tratamiento de estas aguas, provocando así la contaminación de la quebrada Lluchusani. Creando desconfianza y malestar de los pobladores por la irresponsabilidad de estas actividades.

Este vertimiento de drenaje ácido hacia la quebrada Lluchusani no está cumpliendo con los valores establecidos en las normas legales (Estándar Nacionales de Calidad Ambiental para Agua D.S N° 015-2015-MINAM, Categoría 3 – Bebida de Animales y Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-

2010-MINAM, Limite en cualquier momento) que se aplica a la minera, ya que existe altos índices de concentración de metales pesados en la quebrada.

Finalmente, los trabajadores de la empresa Aruntani que operan el sistema de tratamiento, no son sensibles a los efectos que se produce en el ambiente por el vertimiento de agua de mala calidad hacia la quebrada, perjudicando así a la población mediante la malformación y muerte de sus animales.

Ante esta situación se realizó este estudio de investigación para la remoción de los metales pesados presentes en el drenaje ácido de mina, con la finalidad de disminuir la contaminación por metales pesados y mejorar la calidad de agua de la quebrada Lluchusani, evitando así los daños generados al ambiente.

1.2. Justificación de la investigación

Se considera que la actividad minera no solo produce un impacto ambiental sobre el medio ambiente, también produce lo que se denomina impacto socioeconómico, es decir, una alteración sobre los modos de vida y la economía de la región en que se implanta; el mismo se refiere a una inadecuada gestión minera que no solo contamina las corrientes de agua, sino también sus sembríos y sus tierras.

Hoy en día existen numerosos conflictos entre las comunidades y las empresas mineras por el manejo de los recursos, como la tierra y el agua. Además se debe tener en cuenta que la minería no es una actividad sostenible en el tiempo, ya que finaliza cuando ya no hay mineral que extraer y luego se

retira; es por eso que las empresas mineras deben tener claro la importancia de cada una de las etapas de un proyecto minero, con la finalidad de tener un manejo ambiental y social eficiente con el tiempo.

La minera Aruntani a raíz de sus actividades diarias ha provocado que el drenaje ácido generado en el pie del Botadero Jessica sea desembocado a la quebrada principal, teniendo problemas con la comunidades por la mala calidad de agua que consumen sus animales y por la contaminación del medio ambiente; es por ello que el presente trabajo busca adecuar un sistema de tratamiento de aguas ácidas; el método que se propone es por neutralización con lechada de Cal ($Ca(OH)_2$), el agua tratada que se obtendrá del sistema de neutralización, cumplirá con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y con Límites Máximos Permisibles, y podrá ser reusada para la diversas actividades que se realizan dentro de la empresa minera (riego de pastos en la zona de cierre y riego de las vías); además el sistema de tratamiento disminuirá la carga contaminante de metales presentes en el drenaje ácido, con la finalidad de no generar impacto ambiental en la quebrada Lluchusani.

No solo la empresa minera se beneficiará con el agua tratada que se obtendrá por la neutralización con Lechada de Cal, sino también las comunidades del entorno de estudio, debido que mejorará la calidad del agua y disminuirá la mortandad de sus animales, por lo tanto el índice de conflictos socio ambientales disminuirá.

Según Lottermoser (2011) menciona que el sistema de tratamiento a aplicar tiene un gran costo económico, debido a la implementación y

mantenimiento del sistema; asimismo este sistema tiene un impacto ambiental debido a generación de lodos que se produce por la neutralización del efluente ácido; sin embargo el gasto del sistema y el impacto ambiental que se tiene, será retribuido por disposición adecuada y venta de estos lodos a empresas que se encargan de la recuperación de los metales que contienen en ello.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar la eficiencia de la remoción de metales presentes en las aguas ácidas de mina mediante neutralización activo con lechada de cal

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar la eficiencia de remoción de los parámetros físicos químicos e inorgánicos en los ensayos de laboratorio mediante neutralización activo con lechada de cal.
- Analizar los parámetros físicos químicos e inorgánicos del afluente y el efluente a nivel de campo de la neutralización activo con lechada de cal.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Remediation of heavy metal contaminated groundwater originated from abandoned mine using lime and calcium carbonate (Lee, Sung, Kim, Kang, & Leé, 2007)

Se investigó la capacidad del tratamiento químico con cal y carbonato de calcio para eliminar metales pesados y arsénico presentes de aguas subterráneas contaminadas originadas de una mina de hierro abandonada en Corea. Lee et al. (2007) se realizaron experimentos en columnas y en escala piloto para un tratamiento químico que incluía el uso de coagulantes para remediar el agua subterránea contaminada con metales pesados. Como coagulantes se utilizaron cal de granulado ($Ca(OH)_2$) y carbonato de calcio ($Ca(CO)_3$).

Los resultados obtenidos utilizando cal granulada como coagulante en el experimento con columna, se eliminaron más del 98% de As y Ni de agua artificialmente contaminada. Cuando se utilizó carbonato de calcio granulado en el agua artificialmente contaminada, las eficiencias de eliminación de Ni y Zn fueron más del 97%, pero como eficacia de eliminación fue inferior al 50%. Para el experimento en columna continua con cal mezclada y carbonato cálcico a una relación 1: 1, casi todo el As se

eliminó y se eliminó más del 98% de Ni. Para experimentos a escala piloto, las eficiencias de eliminación de As y Cd fueron superiores al 96% para el tratamiento de aguas subterráneas de 150l y su capacidad de eliminación acumulada mantenida linealmente. Esto sugiere que los coagulantes podrían tratar más de 22 veces más volumen de agua subterránea en comparación con el volumen de coagulantes utilizados.

2.1.2. Removal of trace metals by coprecipitation with Fe, Al and Mn from natural waters contaminated with acid mine drainage in the Ducktown Mining District, Tennessee (G. Lee, Bigham, & Faure, 2002).

Lee et al. (2002) examinó la sorción de metales traza a los precipitados formados por la neutralización de 3 aguas superficiales contaminadas con drenaje ácido de la mina (AMD) en el antiguo Distrito Minero de Ducktown, Tennessee. El método que emplearon es la filtración de las 3 muestras, en el laboratorio a través de filtros de membrana de 0,45 μ m. y se añadieron cantidades graduadas de una solución saturada de NaOH para aumentar el pH y precipitar así Fe, Al y Mn. Después se midió el pH diariamente con el fin de determinar la cantidad máxima de precipitado que podría formarse por neutralización de estas soluciones. Luego se centrifugaron a 3000 rpm durante 20 min y las soluciones sobrenadantes se filtraron a través de filtros de 0,45 μ m. Los filtrados se analizaron por espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP). Los elementos de alta concentración (Na,

Mg, Ca, K, Fe, Al, Mn y Zn) fueron analizados mediante espectrometría de emisión óptica (OES), mientras que los metales traza (Cu, Ni, Co, Cd y Pb) por espectrometría de masas (MS). Los resultados que obtuvieron Lee et al. (2002) muestran que existen varios fenómenos relacionados con la eliminación de metales traza. El hierro, el Al y el Mn se vuelven no conservadores y forman precipitados en diferentes rangos de pH. Además la sorción de metales traza generalmente coincide con la precipitación del más abundante de estos 3 elementos. Por lo tanto, la dependencia del pH de la sorción es causada no sólo por cambios en los coeficientes de sorción de los metales traza, sino también por el hecho de que la formación y composición del sorbente está controlada por el pH y la química del agua.

2.1.3. Study of pH influence on Selective Precipitation of Heavy Metals from Acid Mine Drainage (Balintova & Petrilakova, 2011).

En Smolnik, Eslovaquia, en el 2011, se realizó un estudio de la influencia del pH en la precipitación de metales del drenaje ácido de la mina abandonada Smolnik, con el objetivo de determinar la posibilidad de recuperación selectiva de metales. El drenaje ácido contenía altas concentraciones de metal que dependían de la intensidad de la lluvia (por ejemplo, Fe 500 - 400 mg/l, Cu 3 - 1 mg/l, Zn 13 - 8 mg/l y Al 110 - 70 mg/l). Este drenaje ácido acidifica y contamina el agua del arroyo Smolnik, que transporta la contaminación hacia la cuenca hidrográfica del Rio Hnilec. Para el experimento utilizaron 500 ml de drenaje ácido, que se neutralizó

con el hidróxido de sodio (NaOH) bajo agitación química y monitorización del pH. Basado en los experimentos realizados afirmaron que la neutralización con hidróxido de sodio a pH de 8.2 fue eliminada: 92.3% de cobre, 93.3% de zinc, 96.6% de hierro, 99.9% de aluminio y 15.9% de manganeso; asimismo estos resultados se utilizarían para el diseño de tecnología para la recuperación selectiva de metales del drenaje ácido de mina.

2.2. Drenaje Ácido de Mina (DAM)

El drenaje ácido de mina es la acidificación del agua superficial y subterránea en una mina al estar en contacto con minerales metalíferos en las labores mineras, diques de cola y/o escombreras (Figura 1) (Kirschbaum & Murray, 1997). Asimismo es agua con niveles de pH bajos (en general $\text{pH} < 4$), con altos contenidos de Fe^{+2} y SO_4^{2-} disueltos, presentan elevada conductividad eléctrica, grandes cantidades de metales en solución que son potencialmente tóxicos como As, Cd, Pb, Zn, Cu, Hg, Sb, Se, etc. (Lottermoser, 2007). Sin embargo las concentraciones de metal en el drenaje ácido dependen del tipo y cantidad de minerales sulfuros presentes, y la calidad total del agua de las áreas perturbadas depende de los minerales productores de ácido (sulfuro) y neutralizantes de ácidos (carbonato) contenidos en la roca perturbada. Por lo tanto, los materiales ricos en sulfuros y carbonatos pobres

producen drenaje ácido, mientras que los materiales ricos en carbonatos producen condiciones alcalinas en el drenaje (J. G. Skousen, 2002).



Figura 1. Drenaje ácido de mina

2.2.1. Clases de Drenaje de Minas

Skousen & Ziemkiewicz (1996) clasifican a partir del pH y el contenido de oxígeno y metales pesados cinco tipos básicos de aguas ácidas.

Tipo 1: Contiene muy poco o nula alcalinidad y elevada acidez ($\text{pH} < 4.5$). Presenta alta concentración de hierro, aluminio, manganeso y otros metales, y de oxígeno disuelto.

Tipo 2: Alto contenido en sólidos disueltos totales, en manganeso y hierro ferroso, bajo o nulo contenido en oxígeno disuelto y pH superior a 6. Al

producirse la oxidación de los metales, el pH del agua desciende drásticamente y se transforma en agua del Tipo 1.

Tipo 3: Contenido de alto a moderado en sólidos disueltos, hierros ferrosos y manganeso, bajo o nulo contenido en oxígeno disuelto, pH superior a 6 y contenido en alcalinidad superior al de acidez. El ácido generado en la oxidación e hidrólisis de los metales es neutralizado por la alcalinidad contenida en el agua.

Tipo 4: Drenaje ácido neutralizado, con pH superior a 6 y alto contenido en sólidos en suspensión. La precipitación de los hidróxidos aún no se ha producido. Con un tiempo de residencia adecuado en una balsa de decantación, las partículas sedimentan y el agua se transforma en el Tipo 5.

Tipo 5: Drenaje ácido neutralizado, con pH superior a 6 y alto contenido en sólidos disueltos después de que la mayoría de los hidróxidos han precipitado, los principales cationes que permanecen en solución son calcio y magnesio. Los aniones y bicarbonato también permanecen en solución.

Otros tipos de agua ácida se producen en minas con bajo contenido en sulfuros y bajas o moderadas cantidades de carbono. El agua generada en ellas suele ser pH cercano a la neutralidad, baja conductividad ($<100\mu\text{S}/\text{mm}$) y acidez y alcalinidad equilibradas. Estas aguas se consideran inertes o neutras.

2.2.2. Reacciones químicas y biológicas relacionadas con la generación Ácida

El proceso de formación de los drenajes ácidos de minas está directamente relacionado a los depósitos de sulfuros y de carbón, ya que ellos poseen minerales metalíferos que en contacto con las condiciones atmosféricas generan acidez en el agua natural (Chaparro, 2015). A menudo esta agua ácida se caracteriza por tener ph bajo, altas cantidades de metales disueltos tales como hierro (Fe), aluminio (Al) y sulfato (Skousen, 2002). Y esto sucede por la remoción de material para la apertura de tajos, túneles, acopios de material estériles de mina, disposición de relaves sin ningún tipo de control (Chaparro, 2015).

Algunos autores mencionan que las reacciones de ácido se expresan generalmente como la oxidación de la pirita, uno de los minerales sulfurosos más comunes (López et al; 2002; MEMD, 1996; Maree & du Plessis, 1994; EPA, 1983). Por lo tanto Nordstrom & Alpers (1999), describen el proceso de oxidación de la pirita; esta oxidación se observa comúnmente 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 estériles y residuos. (Skousen et al., 1998; Nordstrom & Alpers, 1999; USEPA, 1996 y 2000; entre otros) explican las reacciones que se producen en la generación de agua ácidas a partir de la oxidación de la pirita (FeS_2). Por ser

uno de los sulfuros más comunes que acompañan a las menas de interés económico.

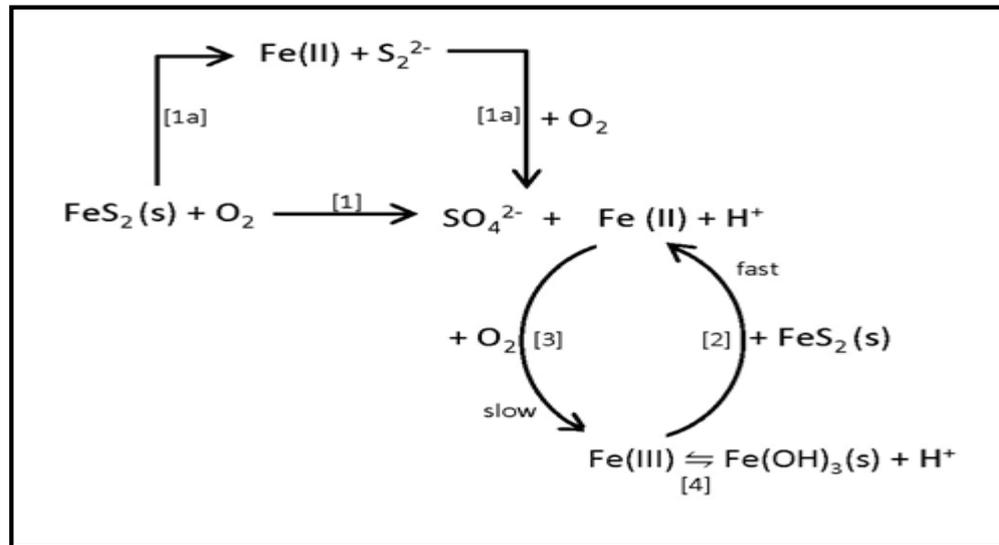
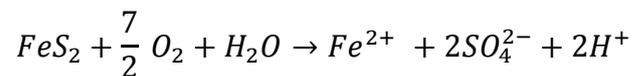


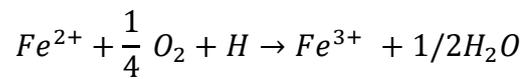
Figura 2. Oxidación de la pirita (Stumm y Morgan, 1981).



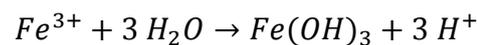
En esta primera reacción se produce el hierro (ion ferroso) sulfato e hidrogeno.

Los compuesto disueltos Fe^{+2} , SO_4^{2-} e H^+ , representar un incremento en el total de solidos disueltos y de la acidez del agua provocando una disminucion del pH.

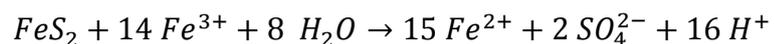
Si el ambiente externo es suficientemente oxidante, entonces muchos iones ferrosos se oxidaran a iones férricos.



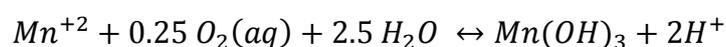
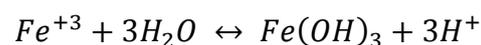
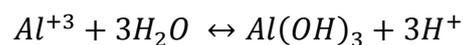
En esta etapa el pH aún permanece en valores entre 3.5 a 4.5 el ion férrico es catalizado por la bacteria *Metallogenium* y a pH por debajo de 3.5 la reacción es catalizada por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*. Por lo general, a pH entre 2.3 a 3.5 el ion férrico formado se oxida e hidroliza para formar hidróxidos $Fe(OH)_3$ que son precipitados de color amarillo, naranja o rojo que se observa en las mayoría de minas que generan acido.



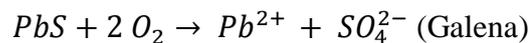
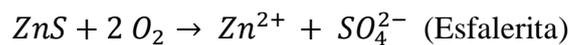
Los cationes del ion férrico que no precipitan en la solución y que aún permanecen en el medio circundante, pueden seguir oxidando a la pirita y producir nuevamente iones ferrosos, sulfatos e hidrogeno.



Aunque no es una fuente importante de acidez, la generación de iones de hidrógeno cuando ciertos metales forman precipitados, deben tenerse en cuenta al considerar las opciones de tratamiento (Costello, 2003).



Otros sulfuros que están presentes en los yacimientos metalíferos también son alterados al estar en contacto con los agentes atmosféricos (agua y oxígeno), sin embargo el potencial de generación de acidez es menor comparado con el de la pirita, como en el caso de la arsenopirita (FeAsS) y calcopirita (CuFeS₂). La esfalerita (ZnS) y la galena (PbS) al oxidarse no aportan acidez pero si liberan plomo y zinc, elementos que son peligrosos para el medio ambiente, la salud humana y que en el agua ácida son solubles (Kirschbaum & Murray, 1997b) .



2.2.3. Etapas de formación de aguas ácidas

Ferguson & Erickson (1987) identificó tres etapas en la generación de drenaje ácido de mina, dependiendo del pH de la solución del efluente. A medida que el pH disminuye por las reacciones de oxidación, se desarrollan distintas reacciones de neutralización por parte de los minerales consumidores de ácido, en la figura 3 es posible observar la evolución de pH en el tiempo (Broughton & Robertson, 1992)

La Etapa I puede durar semanas, meses o años dependiendo del potencial de neutralización contenido. Se desarrolla a un rango de pH casi neutro, la mayor parte de la oxidación es química por el oxígeno del aire. El

producto de la oxidación de los minerales sulfurados son sulfatos, hierro ferroso y acidez, el cual es rápidamente neutralizada por la alcalinidad presente en la roca (Broughton & Robertson, 1992). Cuando carbonatos, silicatos y otros minerales alcalinos dejan de estar disponibles, el pH de la solución comienza a disminuir gradualmente. Si la generación de acidez en el tiempo continúa mayor a la capacidad del mineral para neutralizar, el pH continuará acidificándose hasta alcanzar las etapas II y III, de la generación del drenaje ácido (Ferguson & Erickson, 1987).

En la Etapa II el pH del microambiente ha disminuido hasta 4.5, las poblaciones de las bacterias amantes del ácido (acidófilas) como *Thiobacillus ferrooxidans* comienzan a multiplicarse (Ferguson & Erickson, 1987). La oxidación de estas bacterias aumenta la velocidad de producción de ácido. En esta etapa los valores de solución pH son ácidos y se observan elevados niveles de sulfato, acides y metales disueltos (Broughton & Robertson, 1992). En la reacción se produce el sulfato ferroso que al ser oxidado nuevamente se transforma en sulfato férrico, y éste a su vez en contacto con el agua da lugar al ácido sulfúrico y al hidróxido férrico, que es insoluble y es el que provoca la coloración amarilla de las aguas (Aduvire, 2006).

En la Etapa III cuando el pH alrededor de los sulfuros disminuye por debajo de 3, el hierro férrico permanece en solución. El hierro ferroso es convertido por las bacterias en hierro férrico que a su vez oxida los minerales de sulfuro. La velocidad de formación de ácido es rápida en la última etapa y

está limitada por la concentración de hierro férrico (Ferguson & Erickson, 1987).

Aduvire (2006) indica que en el momento que se producen grandes cantidades de ácido, se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- Si se inhibe la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* la producción de ácido se reduce al menos en un 75%.
- Si el pH del agua sube por encima de 5, igualmente se inhibe la oxidación.
- Si el pH del agua desciende por debajo de 4,5 debe esperarse que todo el sulfuro de hierro termine oxidándose.
- Si el pH desciende por debajo de 2,5 se establece un equilibrio en el que la actividad bacteriana se estabiliza, ya que habrá alcanzado su óptimo de desarrollo.

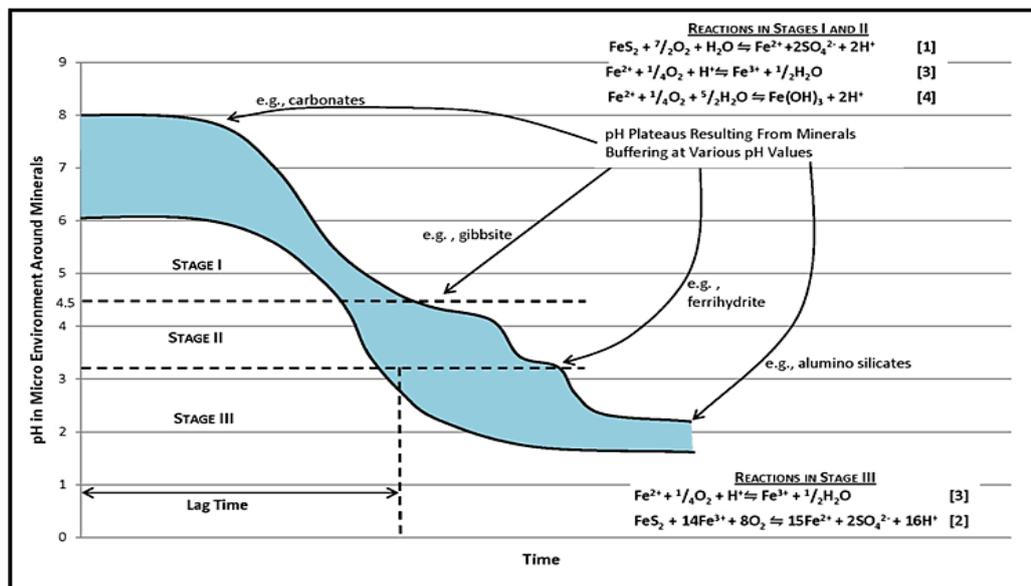


Figura 3. Etapas de generación de drenaje ácido (Ferguson & Erickson, 1987).

2.2.4. Factores que intervienen en la formación de aguas ácidas

Ayala & Vadillo (2004) indica que los factores que influyen en la generación de aguas ácidas a partir de los materiales rocosos que contienen pirita son las siguientes; el pH, la cantidad de oxígeno en la superficie de la pirita, la morfología de los minerales sulfuros presentes, la temperatura, el ritmo al que los productos de reacción son evacuados del lugar de reacción, la capacidad de neutralización de las rocas de estéril en el área de reacción, la humedad y la disponibilidad de dióxido de carbono, nutrientes y elementos trazas esenciales para la existencia de microorganismos.

Otro factor importante es el tamaño de partícula de los minerales de sulfuro, debido que cuanto más fino tiene un área superficial más grande y realza la velocidad de la oxidación. Por lo tanto, el material más fino y más homogéneo que facilita el proceso de neutralización permite que los materiales alcalinos estén muy próximos a los minerales sulfuros generadores de ácido (Kuyucak, 2000). Además Zumarán, Barbosa, & De Souza (2004) indican que los factores que contribuyen en la formación y producción de drenaje, como físico-químicos, bioquímicos, mineralógicos hidrogeológicos, actuando de diferente forma, según el lugar donde se encuentran las fuentes.

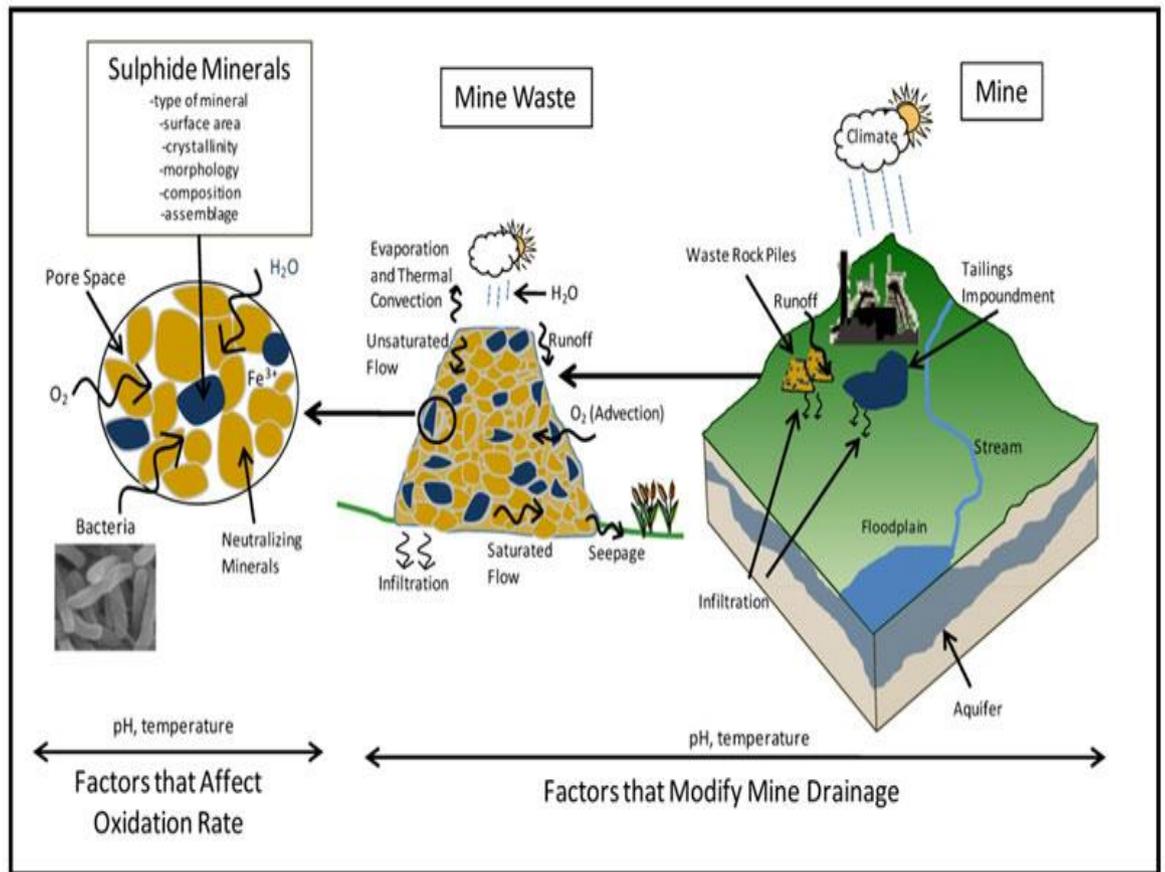


Figura 4. Ilustración esquemática de los factores que afectan la oxidación de los sulfuros y modifican el drenaje de las minas durante el transporte (INAP, 1998).

2.3. Control del drenaje ácido de minas

Son medidas empleadas para reducir la producción del drenaje ácido y minimizar su impacto sobre el medio ambiente. La técnica aplicada varía en función de la etapa de desarrollo en que se encuentre el proceso de formación del drenaje ácido.

La opción más conveniente es la prevención de la reacción de oxidación, mediante la eliminación de uno o más de los componentes

esenciales, o bien mediante el control del ambiente con el fin de limitar la velocidad de generación de ácido a un nivel significante. Si se puede lograr el control primario, los productos de la generación de ácido no se manifestarán y el control secundario o terciario será innecesario (Broughton, 1995).

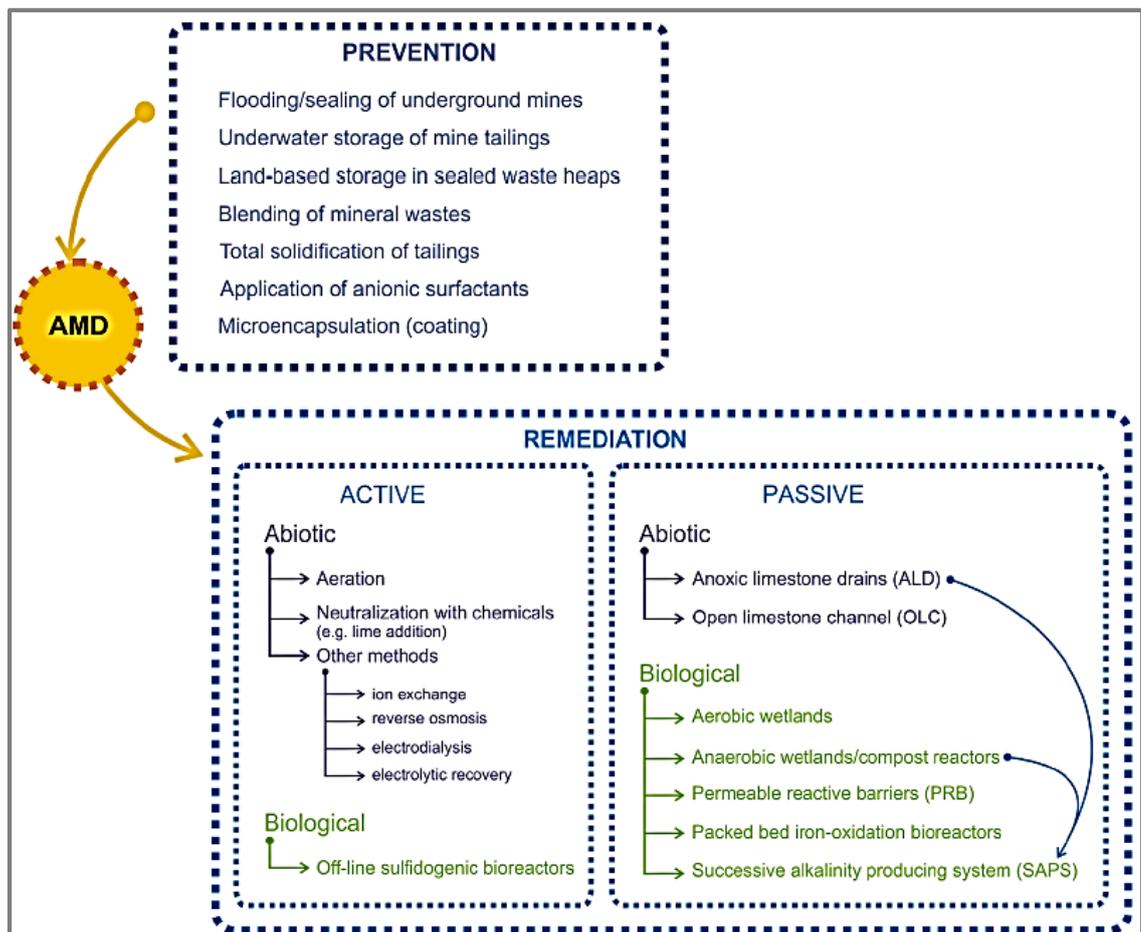


Figura 5. Ejemplos de estrategias para prevenir o minimizar la generación de AMD y diferentes técnicas de tratamiento para agua ácidas (métodos activos o pasivos y métodos biológicos o abióticos) (Favas, Sarkar, Rakshit, Venkatachalam, & Prasad, 2016).

Los métodos para el control del drenaje ácido de minas se pueden clasificar en tres categorías:

2.3.1. Control Primario o Métodos preventivos

Su objetivo es detener o reducir en definitiva la velocidad de la generación de ácido. Esto se puede realizar, impidiendo el contacto de los sulfuros con el agua o el aire, o ambos, eliminando las bacterias responsables de la catálisis de las reacciones o controlando otros factores que influyan sobre las reacciones, tal como el pH, por adición de álcali al sistema (Aduvire, 2006).

Es por eso que las técnicas de prevención del drenaje ácido de mina son muy amplias y varían dependiendo del sitio, de las condiciones climáticas y del tipo de explotación que se haya realizado (minería a cielo abierto o subterráneo) (Laura Chaparro, 2015).

En la siguiente tabla se resumen algunos de los métodos preventivos de formación de drenajes ácidos de mina.

Tabla 1. Métodos preventivos de formación de Drenaje Ácido de Mina (Escobar, 2008).

| Método | Objetivo | Medida de Control |
|-----------------------|---|---|
| Barrera | Eliminación o aislamiento de los sulfuros | Acondicionamiento, impermeabilización y depósito selectivo de estériles y residuos. |
| | | Microencapsulado |
| | | Retirada Física de los sulfuros |
| Químico | Exclusión del Agua | Revegetación de terrenos |
| | | Cunetas de desvío del agua |
| | | Remodelado de la superficie |
| Químico | Exclusión del Oxígeno | Recubrimiento y sellado |
| | | Depósitos subacuáticos (inundación) |
| | | Recubrimiento y sellado |
| Químico | Control de pH | Adición de materiales alcalinos y fosfatos |
| | | Empleo de dispositivos rellenos con material carbonatado |
| | | Mezcla de los materiales ácido/base y vertido selectivo |
| Químico | Control y supresión de la acción bacteriana | Adición de materiales alcalinos y fosfatos |
| | | Empleo de dispositivos rellenos con material carbonatado |
| | | Mezcla de los materiales ácido/base y vertido selectivo |
| Inhibición bacteriana | Control y supresión de la acción bacteriana | Aplicación de bactericidas |
| | | Adición de fosfatos |

2.3.2. Control secundario o Método de Contención

Ayudan a prevenir o reducir la migración de drenajes ácidos de mina al ambiente, tales como la escorrentía e infiltración (Broughton, 1995). El agua es el principal mecanismo de transporte de los productos de oxidación. El control de la migración requiere el control primario de la infiltración de agua superficial y subsiguiente lixiviación y limpieza, con cubiertas y sellos sobre

la pila de rocas o rellenos de vertederos junto con el desvío aguas arriba de aguas superficiales y aguas subterráneas no contaminadas a través de zanjas, paredes de corte o pozos (Broughton & Robertson, 1992).

2.3.3. Control terciario o Método de remediación

Constituyen el tercer nivel de control y su objeto es recolectar y tratar el drenaje contaminado.

Los métodos pueden ser:

- a) Sistemas activos, los cuales requieren operaciones continuas como una planta de tratamiento químico. La tecnología demostrada para el tratamiento activo es el proceso de neutralización química (cal). La acidez se separa de la solución por neutralización, los metales pesados precipitan como óxidos, hidróxidos o sulfuros. Otros componentes deletéreos, tales como arsénico y antimonio, se eliminan por precipitación (Broughton & Robertson, 1992)
- b) Sistemas pasivos, los cuales funcionan sin un ajustado control.

2.4. Tratamiento Químico Activo de Drenaje Acido

El tratamiento activo del DAR es una tecnología ampliamente conocida y aceptada. Se basan en la adición de sustancias alcalinas, generalmente cal, cal hidratada, caliza triturada, sosa caustica, carbonato sódico o amoniaco, con el fin de conseguir la neutralización del ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para la precipitación de metales pesados (Aduvire, 2006).

Asimismo Aduvire (2006) indica que la mayoría de sistemas de tratamiento activo para aguas ácidas de mina están basados en la precipitación de hidróxidos, que se realiza en un proceso de tres pasos:

- Oxidación (para convertir Fe^{2+} en Fe^{3+})
- Dosis con álcalis, especialmente lechada de Cal ($CaOH_2$), pero también con Na (OH_2), $NaHCO_3$ y otras sustancias
- Sedimentación

Se utilizan seis productos químicos para tratar el drenaje ácido (tabla 2). Cada uno es más o menos apropiado para una condición específica. La mejor opción depende tanto de los factores técnicos (niveles de acidez, flujo, tipos y concentraciones de metales) como económicos (precios químicos, mano de obra, maquinaria y equipo, duración del tratamiento y tasas de interés). Debe añadirse suficiente alcalinidad para elevar el pH entre 6 y 9, de modo que se formarán y se asentarán hidróxidos metálicos insolubles (J. G. Skousen, 2002a).

Tabla 2. Compuesto químico utilizado en el tratamiento de drenaje ácido de mina (J. G. Skousen, 2002).

| Nombre Común | Nombre Químico | Formula | Neutralización (%) |
|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------------|
| Caliza | Carbonato de Calcio | $CaCO_3$ | 30 |
| Cal Hidratada | Hidróxido de Calcio | $Ca(OH)_2$ | 90 |
| Cal viva | Oxido de Calcio | CaO | 90 |
| Ceniza de Soda | Carbonato de Sodio | Na_2CO_3 | 60 |
| Soda Caustica | Hidróxido de sodio | $NaOH$ | 100 |
| Amoniaco | Anhídrido de amoniaco | NH_3 | 100 |

Los sistemas activos generan lodos residuales resultantes de la precipitación de los metales del drenaje ácido (Dempsey & Jeon, 2001). Estos lodos deben ser retirados del sistema de tratamiento regularmente y confinarlos en sitios apropiados o tratarlos metalúrgicamente para la recuperación de metales. De hechos algunos autores consideran que la recuperación de los metales de los lodos pueden pagar parcialmente los costos de tratamiento de agua de drenaje (Miedecke et al., 1997; Lottermoser, 2007)

Warhurst & Noronha (1999) explica los beneficios y las desventajas que tiene el tratamiento activo.

Los beneficios son:

- La planta ocupa una cantidad limitada de espacio (aunque pueden requerirse grandes áreas para la disposición y eliminación de lodos).

- Si existen variaciones inesperadas en la calidad del agua y el flujo pueden ser acomodadas mediante un ajuste relativamente fácil de los parámetros operativos.
- El tratamiento no es afectado por la temperatura, y la eficiencia durante el invierno se mantiene.
- Es eficaz en el tratamiento de aguas altamente ácidas

Las desventajas son:

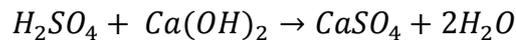
- El mantenimiento de los equipos es relativamente alto. El "alto pH" es necesario para eliminar metales como el manganeso. Sin embargo, basándose en la propia experiencia del autor, ciertos hidróxidos metálicos pueden redisolverse en las soluciones altamente alcalinas requeridas para completar la precipitación del metal, lo que requiere un tratamiento multietapa para reducir todos los metales a concentraciones aceptables
- Los lodos derivados son químicamente inestables y se disolverán parcialmente si se exponen a un ambiente suficientemente ácido (o en algunos casos alcalinos).
- Los lodos son difíciles y caros de manejar, y requieren alguna forma de deshidratación antes de la eliminación.

La Aduvire (2006) indica que el tratamiento en las plantas convencionales se realiza en tres etapas: neutralización, oxidación y

precipitación. Las reacciones principales que tienen lugar según el tipo de agente alcalino que se utilice son:

1°. Neutralización del ácido con una base

Con Cal:



Con Caliza



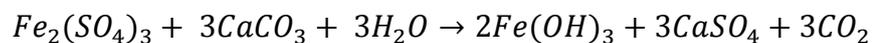
2°. Oxidación del hierro ferroso o férrico

Se realiza tomando oxígeno de la atmósfera mediante la agitación de las aguas en unos tanques. Con esto se consigue modificar el estado del hierro haciéndolo insoluble.

3°. Precipitación de los hidróxidos de hierro

Los hidróxidos se forman al reaccionar el sulfato férrico con los agentes alcalinos.

Con cal:



La solubilidad de los iones metálicos disminuye y precipita, al elevarse el pH en el agua (Wang et al., 2005). Asimismo Wentz, (1989) indica que la precipitación de los metales pesados tendría una gran mejoría

por medio de la adición de varios compuestos químicos solubles en agua y polímeros que promuevan la coagulación y floculación

2.4.1. Tratamiento con Carbonatos

Los productos del proceso de la oxidación de los minerales sulfurados aumentan la acidez del agua, gran parte del amortiguamiento de la acidez generada se logra mediante la reacción de la solución ácida con los minerales formadores de rocas (silicatos, arcillas, hidróxidos y calcita) (Bernd Lottermoser, 2007). El amortiguamiento de pH ocurre a través del consumo de protones (H^+), la reacción ocurre cuando es arrastrado por infiltración del agua o por escurrimiento. (Lapakko et al., 1995),

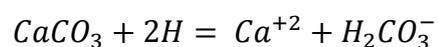
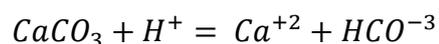
Existe una variedad de minerales que pueden consumir ácido y neutralizar ácido (Bernd Lottermoser, 2007). Entre los minerales que consumen ácido se encuentran:

- Carbonatos de calcio o minerales de carbonato de magnesio: Calcita, Dolomita, Anquerita o Magnesita
- Hidróxidos: Limonita
- Silicatos: Clorita
- Arcillas: Montmorillonita

Los minerales que neutralizan de manera más efectiva son aquellos que contienen carbonato de calcio, debido a que la velocidad de disolución es

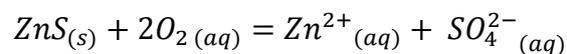
relativamente rápida (Antonson, Haub, & Lapakko, 1998). De los minerales carbonatados, la calcita ($CaCO_3$) se disuelve más rápidamente. La velocidad de disolución de la dolomita [$CaMg(CO_3)_2$] es aproximadamente un orden de magnitud más lenta y la velocidad de disolución de la magnesita ($MgCO_3$) es aproximadamente cuatro órdenes de magnitud más lenta (Lapakko, 2002). La piedra caliza (carbonato de calcio), rica en calcita, aumenta el pH del agua y añade alcalinidad a través de iones bicarbonato (Younger, Banwart, & Hedin, 2002); sin embargo J. Skousen et al., (1998) menciona que su aplicación exitosa ha sido limitada debido a su baja solubilidad especialmente en climas frío, debido que tiende a desarrollar un recubrimiento externo, o armadura, de hidróxido férrico cuando se añade al drenaje ácido, y su incapacidad para elevar el pH a niveles suficientes para la eliminación de Mn. Cuando el pH es bajo y la acidez mineral es también relativamente baja (concentraciones bajas de metal), la piedra caliza finamente molida se puede verter en corrientes directamente o la piedra caliza puede ser molida por los tambores giratorios accionados por agua y dosificada en la corriente (J. Skousen et al., 1998).

La primera ecuación representa la reacción neutralizante de ácido dominante de la calcita ($CaCO_3$) por encima de pH 6.4, mientras que la segunda es la reacción dominante por debajo de pH 6.4 (Drever, 1988).



Otros agentes alcalinos comúnmente usados son la cal hidratada (hidróxido de calcio), carbonato sódico (carbonato sódico), sosa cáustica (hidróxido sódico) y en algunos casos amoníaco (Costello, 2003). Skousen & Ziemkiewicz (1996) indican que el carbonato que más se utiliza en el tratamiento de drenaje ácido es la cal hidratada, sin embargo se requiere una mezcla mecánica extensa para la disolución por ser un polvo que tiende a ser hidrófobo; cabe agregar que la cal hidratada es particularmente útil y rentable en situaciones de gran caudal y alta acidez en las que se construye una planta de tratamiento de cal con mezclador/ aireador para ayudar a dispensar y mezclar el producto químico con el agua.

Los metales traza son iones metálicos que se producen a bajas concentraciones medias en la corteza terrestre, pero pueden estar presentes en niveles elevados en áreas mineralizadas. Los metales traza comúnmente se presentan como minerales de sulfuro, cuya oxidación libera el metal traza de la fase de sulfuro altamente insoluble. Una vez liberados a la solución, existen varios tipos de reacciones que pueden influir en la migración y el destino de estos minerales. En general, los metales pueden permanecer en solución o eliminarse en fases secundarias. Para la eliminación de la solución, los metales traza pueden precipitarse como óxidos, hidróxidos o carbonatos, ser adsorbidos por superficies tales como oxihidróxidos de hierro o coprecipitar con otras fases sólidas (J. Skousen et al., 1998).



Taylor, Pape, & Murphy (2005) demuestran la reacción de neutralización de la acidez u otros iones metálicos usando cal hidratada. Una vez que se ha elevado el pH del agua ácida, los metales pueden precipitar más fácilmente para formar hidróxidos y oxihidróxidos (Costello, 2003).



Taylor, Pape, & Murphy (2005) mencionan que al aumentar el pH para crear condiciones alcalinas, la solubilidad de la mayoría de los metales puede disminuir significativamente por precipitación; debido que los metales del drenaje ácido son anfotéricos, es decir, su solubilidad aumentan en condiciones ácidas (pH bajo) y alcalino (pH alto), y alcanza un mínimo a algún valor de pH intermedio, como se muestra en la figura 6. En realidad, el efecto del pH sobre la solubilidad del metal también dependerá del tipo de alcalinidad presente. Sin embargo la menor concentración de metal disuelto no se alcanza con el mismo pH (Lottermoser, 2007).

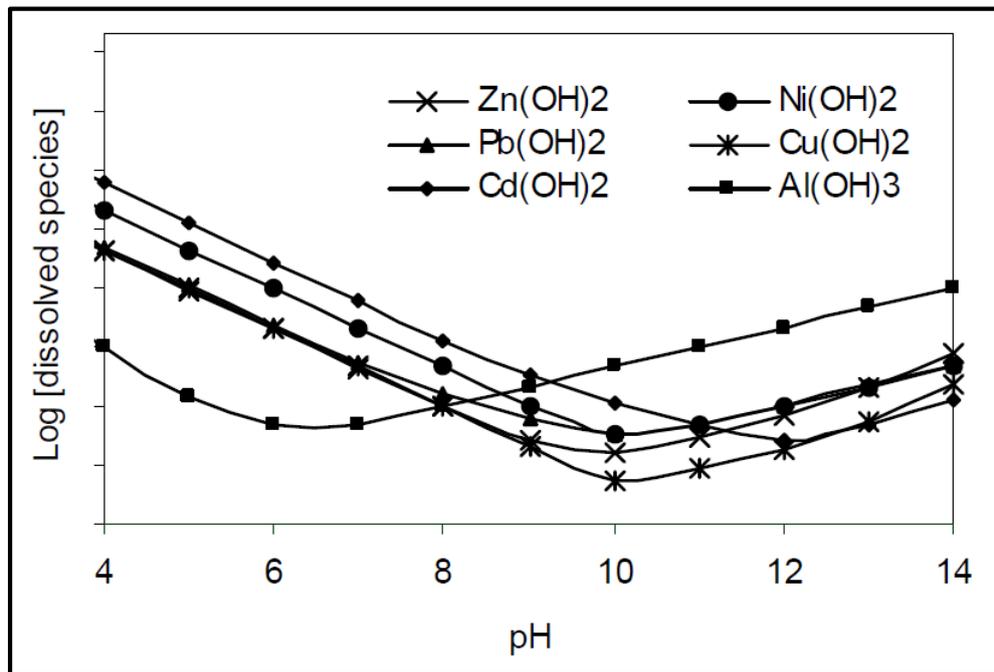


Figura 6. Efecto del pH sobre la solubilidad relativa de los iones metálicos desnudos (acuoso) en equilibrio con sus correspondientes especies de hidróxido metálico (sólido) (Taylor et al., 2005).

El plomo (Pb^{+2}) se precipita en un pH de 6,3; para el hierro (Fe^{+2}) es 9,5 y para el Manganeso (Mn^{+2}) es 10,6. Hay que tomar precauciones cuando están presentes metales anfóteros como el cinc y el aluminio que se disuelven en la solución si ésta es demasiada alcalina (Aduvire, 2006). El hierro se oxida y precipita más rápidamente que el Mn porque los sólidos Mn oxidados son inestables en presencia de Fe^{+2} , por lo que los niveles deben reducirse significativamente antes de que Mn pueda convertirse en precipitados sólidos estables. El manganeso en condiciones aerobias puede formar un oxihidróxidos ($MnOOH$) y óxidos (Mn_3O_4 y MnO_2) y en ambientes alcalinos un carbonato

($MnCO_3$). El sulfuro de manganeso es muy soluble y por lo tanto altamente improbable que permanezca precipitado si se forma en condiciones anaeróbicas (Costello, 2003).

El aluminio se elimina de las aguas manteniendo el pH entre 5 y 8, donde $Al(OH)_3$ es altamente insoluble; el paso del agua de la mina a través de ambientes altamente oxidados o reducidos no tiene efecto sobre las concentraciones de Al (Costello, 2003)

2.4.2. Tratamiento con Sosa Caustica

La sosa cáustica (es decir, lejía, NaOH) se usa a menudo en situaciones remotas de bajo flujo, alta acidez, o si las concentraciones de Mn en el drenaje ácido son altas. El sistema puede ser alimentado por gravedad o por goteo de NaOH líquido directamente en el drenaje ácido (Skousen, 2002). Se requiere de menor cantidad como agente neutralizante, ya que tiene más poder que el calcio o las piedras de calcio (Nemerow & Dasgupta, 1998). El cáustico es muy soluble, se dispersa rápidamente y aumenta el pH rápidamente. El cáustico se debe aplicar en la superficie de los estanques porque el producto químico es más denso que el agua. Los inconvenientes principales del uso de NaOH líquido para el tratamiento con AMD son altos costos y peligros en el manejo (Skousen, 2002). Este método es adecuado para pequeños volúmenes, pero para neutralizar grandes volúmenes es necesario un equipo especial de dosificación (Nemerow & Dasgupta, 1998).

2.4.3. Tratamiento con Amoníaco

Los compuestos de amonio (NH_3 o NH_4OH) son extremadamente peligrosos. NH_3 se comprime y almacenado como un líquido pero vuelve al estado gaseoso cuando se libera. El amoníaco es extremadamente soluble, reacciona rápidamente y puede elevar el pH del agua receptora hasta 9,2. A pH 9,2, amortigua la solución a mayores aumentos de pH, por lo que se deben añadir cantidades muy elevadas de NH_3 para ir más allá de 9,2. La inyección de NH_3 en AMD es una de las formas más rápidas de elevar el pH del agua y debe inyectarse cerca del fondo del estanque o de la entrada de agua porque el NH_3 es menos denso que el agua. El NH_3 es barato y una reducción del coste del 50% al 70% se realiza normalmente cuando NH_3 se sustituye por NaOH (Skousen et al., 1990). Las principales desventajas del uso de NH_3 incluyen: 1) los peligros; 2) la incertidumbre sobre la nitrificación, la desnitrificación y la acidificación aguas abajo; y 3) las consecuencias de las tasas de aplicación excesivas, que causan condiciones tóxicas para la vida acuática (Skousen, 2002).

2.5. Problemática de los Drenajes Ácidos de Mina

El principal problema ambiental asociado a los yacimientos minerales sulfurados se relaciona con la dispersión de los mismos hacia su entorno. En las zonas lluviosas, esta problemática ambiental está relacionada con la generación de drenaje ácido y su dispersión a través de los escurrimientos superficiales (dispersión hídrica) o subterráneas, mientras que en las zonas

áridas se relaciona con la dispersión provocada por el viento (dispersión eólica) (Romero et al., 2008). Los impactos negativos pueden ser de mayor o menor grado dependiendo del proyecto minero y su diseño, algunos de ellos pueden darse simultáneamente y persistir por siglos (Balvín & Amezaga, 2006). Por lo tanto es un problema continuo para las entidades gubernamentales, la industria privada y el público en general (Durkin & Herrmann, 1994).

Gray (1997) indica que el drenaje ácido de mina se reconoce como un contaminante multifactor y la importancia de cada factor varía dentro y entre los sistemas afectados. Los principales factores son la acidez en sí, la salinización, la toxicidad del metal y los procesos de sedimentación. El daño resultante depende de la frecuencia, el volumen y las especies químicas presentes en el drenaje ácido. La figura 7 muestra las actividades mineras junto con algunas consecuencias ambientales asociadas (Zumarán et al., 2003).

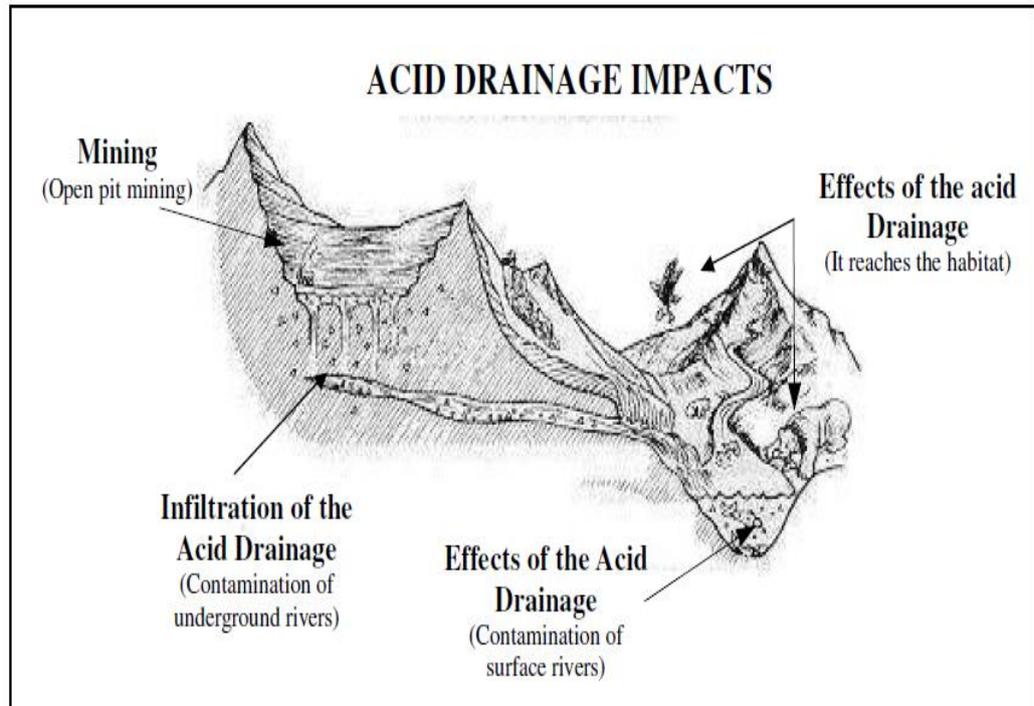


Figura 7. Representaciones esquemáticas de los efectos ambientales del drenaje ácido.

El drenaje ácido de la mina afecta a los sistemas lóticos de maneras numerosas e interactivas. Esto da lugar a múltiples presiones, directas e indirectas, sobre los organismos que componen la estructura comunitaria del ecosistema. Estos efectos pueden clasificarse de forma poco clara como químicos, físicos, biológicos y ecológicos, aunque el impacto global sobre la estructura de la comunidad es la eliminación de especies, simplificando la cadena alimentaria y reduciendo significativamente la estabilidad ecológica; comúnmente el drenaje ácido provoca en los ecosistemas colapsos rápidos y totales (Gray, 1997).

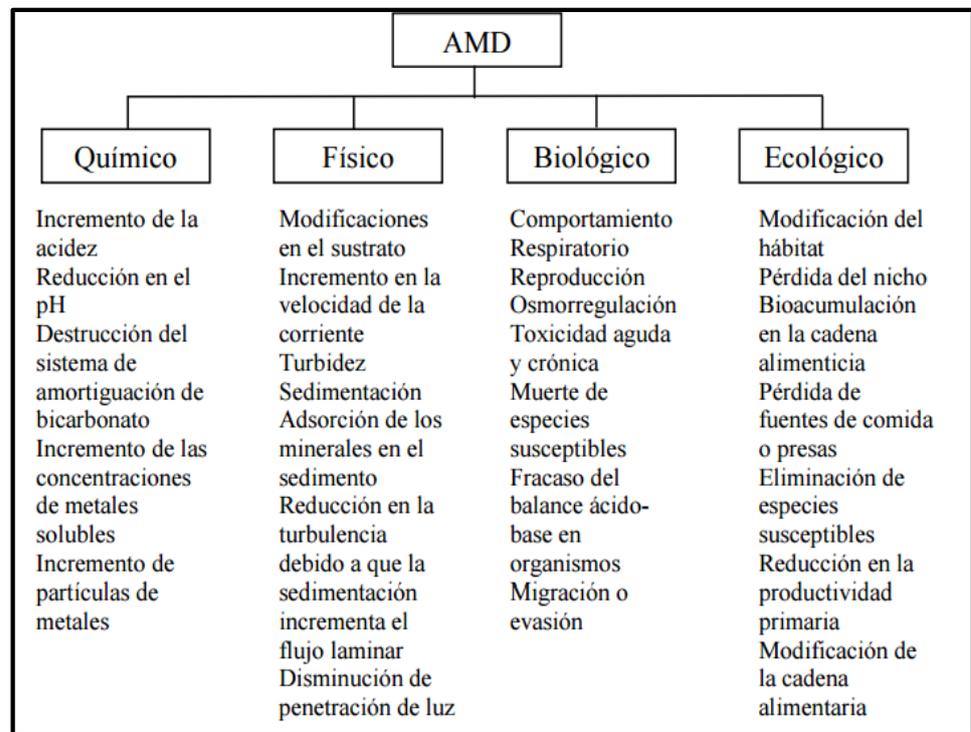


Figura 8. Los principales efectos del drenaje ácido sobre los sistemas lóticos (Gray, 1997).

La contaminación hídrica causada por los drenajes ácidos, es probablemente el impacto más significativo de las operaciones de mina. La calidad del agua se vuelve inapropiada para el uso doméstico y para el desarrollo natural de la flora y fauna (Zumarán et al., 2003). Los valor de pH (<4.0) y las elevadas concentraciones de metales (100-3000 mg/L), son considerados como los componentes más críticos. Las concentraciones de Zn, Cd y Cu, son tóxicas en pequeñas cantidades (<1mg/L), y cooperan para suprimir el crecimiento de la flora acuática. La precipitación de hidróxidos, además de disminuir el oxígeno, aumentan la turbidez, sólidos suspendidos

(100 – 30000 mg/L) que envenenan el alimento de los peces (Gould, 1996). Asimismo el drenaje ácido causa efectos toxicológicos en los ecosistemas acuáticos, si la exposición es a largo plazo puede causar mortalidad u otros efectos, tales como crecimiento atrofiados, bajas tasas de reproducción, deformidades y lesiones (Udayabhanu & Prasad, 2010).

Las características típicas del drenaje ácido de mina son mostradas en la tabla 3.

Tabla 3. Características típicas del drenaje ácido de mina

| Propiedades | Especies Químicas Típicas Asociadas | Intervalo de Concentración | Impacto |
|--------------------|---|-----------------------------------|--|
| Acidez | Ácido Sulfúrico | 2.0 – 4.0 (pH) | Movilización de iones metálicos |
| Hierro | Iones Ferroso y Férrico, óxido férrico, Hidróxidos. | 100 – 3000 (mg/L) | Decoloración e turbidez en las aguas, Incremento del pH, precipitación de Fe III |
| Metales Pesados | Cu, Mg, Zn, Cd, Hg, Pb, As. | 1 – 200 (mg/L) | Reducción de la flora y fauna acuática, bio-acumulación y reducción de la calidad y abastecimiento de agua Potable |
| Sólidos Totales | Ca, Mn, Al, SO_4 | 100 -30 000 (mg/L) | Reducción de la calidad de agua en el abastecimiento |

López et al., (2002) indican que la mortandad de peces y crustáceos de ríos, afecciones al ganado, y destrucción de cultivos y riberas; siempre están

asociados a una coloración ocre-amarillenta (precipitados de hierro y sulfatos) de los lechos de ríos y lagos afectados, y un incremento de la turbiedad de las aguas.

En el caso de la flora la alta concentración de iones de hidrógeno y sulfatos, provoca la inactivación de los sistemas enzimáticos, restringe la respiración y la recepción de sales, minerales y agua a través de la raíz (Gray, 1997); por lo que impide su normal crecimiento (L Chaparro, 2015). Sin embargo existen plantas que tienen la capacidad de acumular grandes cantidades de metales en sus tejidos se denominan "hiperacumuladores" y crecen en sustratos enriquecidos con metal y metaloides; los animales de pastoreo pueden consumir estas hierbas y suelos contaminados, esto puede conducir a problemas de salud potenciales para los seres humanos debido a la exposición a largo plazo a contaminantes en productos alimenticios cultivados localmente (Lottermoser, 2007).

2.6. Marco Legal

La necesidad de armonizar los objetivos de desarrollo económico y social con un adecuado manejo del medio ambiente, ha permitido establecer en el Perú instrumentos jurídicos. En el proyecto se aplicara la siguiente normatividad.

2.6.1. Ley N° 28611, Ley General del Ambiente

Ley promulgada el 13 de Octubre de 2005, es la norma ordenadora del marco normativo legal para la gestión ambiental en el Perú. Establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país.

2.6.2. Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos

Esta ley dada el 23 de marzo del 2009, tiene por finalidad regular el uso y gestión integrada de los recursos hídricos. Comprende el agua (superficial, subterránea y continental; marítima y atmosférica en lo que resulte aplicable), la actuación del Estado y los particulares en dicha gestión, así como los bienes asociados a esta.

Entre otros aspectos importantes, la presente ley propicia el cambio en el modo de pensar y en las actitudes sobre el valor, uso y gestión del agua por todos los sectores sociales y productivos, en especial la agricultura, para que su aprovechamiento sea eficiente y productivo, poniendo especial interés en minimizar los impactos en los ecosistemas.

La nueva legislación promueve la mitigación de la contaminación de las aguas, ocasionada por los residuos de los pueblos y ciudades y de las actividades productivas, la industria, la minería, la agricultura, entre otras.

2.6.3. D.S. N° 010-2010-MINAM, Límites Máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas.

El decreto tiene por objeto regular la gestión las descargas de los efluentes líquidos de las actividades minero-metalúrgicas.

2.6.4. D.S. N° 002-2008-MINAM, Aprueban los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua

Esta norma, aprueba los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, con el objetivo de establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente.

Estos estándares son aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural y son obligatorios en el diseño de las normas legales y las políticas públicas siendo un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

2.6.5. D.S. 015-2015-MINAM, Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación.

Se modificaron los parámetros y valores de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobados por Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM.

Tabla 4. Categoría 3: Riego de vegetales y bebidas de animales (MINAM, 2015).

| CATEGORIAS | | ECA AGUA : CATEGORIA 3 | |
|--------------------------------------|------------------------------|--|-------------------------------------|
| PARAMETRO | UNIDAD | PARAMETROS PARA RIEGO DE VEGETALES | PARAMETROS PARA BEBIDAS DE ANIMALES |
| | | D1: RIEGO DE CULTIVOS DE TALLO ALTO Y BAJO | D2: BEBIDA DE ANIMALES |
| FÍSICOS – QUÍMICOS | | | |
| Aceites y grasas | mg/L | 5 | 10 |
| Bicarbonatos | mg/L | 518 | ** |
| Cianuro Wad | mg/L | 0.1 | 0.1 |
| Cloruros | mg/L | 500 | ** |
| Color (b) | Color verdadero escala Pt/Co | 100 (a) | 100 (a) |
| Conductividad | (uS/cm) | 2500 | 5000 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) | mg/L | 15 | 15 |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | mg/L | 40 | 40 |
| Detergentes (SAAM) | mg/L | 0.2 | 0.5 |
| Fenoles | mg/L | 0.002 | 0.01 |
| Fluoruros | mg/L | 1 | ** |
| Nitratos($NO_3^- N$) | mg/L | 100 | 100 |
| Nitritos ($NO_2^- N$) | mg/L | 10 | 10 |
| Oxígeno Disuelto (valor mínimo) | mg/L | 4 | 5 |

| | | | |
|-----------------------------|--------------|-----------|-----------|
| Potencial de Hidrógeno (pH) | Unidad de pH | 6.5 – 8.5 | 6.5 – 8.4 |
| Sulfatos | mg/L | 1000 | 1000 |
| Temperatura | °C | Δ3 | Δ3 |
| INORGÁNICOS | | | |
| Aluminio | mg/L | 5 | 5 |
| Arsénico | mg/L | 0.1 | 0.2 |
| Bario | mg/L | 0.7 | ** |
| Berilio | mg/L | 0.1 | 0.1 |
| Boro | mg/L | 1 | 5 |
| Cadmio | mg/L | 0.01 | 0.05 |
| Cobre | mg/L | 0.2 | 0.5 |
| Cobalto | mg/L | 0.05 | 1 |
| Cromo Total | mg/L | 0.1 | 1 |
| Hierro | mg/L | 5 | ** |
| Litio | mg/L | 2.5 | 2.5 |
| Magnesio | mg/L | ** | 250 |
| Manganeso | mg/L | 0.2 | 0.2 |
| Mercurio | mg/L | 0.001 | 0.01 |
| Níquel | mg/L | 0.2 | 1 |
| Plomo | mg/L | 0.05 | 0.05 |
| Selenio | mg/L | 0.02 | 0.05 |
| Zinc | mg/L | 2 | 24 |

Fuente: MINAM

2.7. Aspectos generales del proyecto de estudio

2.7.1. Ubicación

El proyecto Jessica de la Unidad Minera Arasi se ubica en las inmediaciones de los cerros Quinsachota y Huarucani de las porciones altas de las microcuencas de los riachuelos Azufrini y Huarucani, afluentes del río Chacapalca, de la cuenca del Ramis, distrito de Ocuvi, provincia de Lampa, departamento de Puno a una altitud comprendida entre 4500 y 5100 msnm.

2.7.2. Accesibilidad

El acceso al área del proyecto, partiendo desde Lima a Juliaca es vía aérea (2 horas) o vía terrestre (22 horas) recorriendo una distancia de 1 290,00 Km., luego de la ciudad de Juliaca a Lampa se recorre una distancia de 34 Km., siguiendo la ruta Lampa – Ocuvi, pasando por los poblados de Palca y Vila hasta el pequeño poblado de Chivay recorriendo una distancia de 60 Km., para luego acceder al área del proyecto a través de una trocha carrozable de 16 Km. en dirección oeste, recorriendo un total de 1405,00 Km. desde Lima.

Existe otra ruta alternativa que es utilizada por las condiciones existentes en épocas de lluvias y de mayor seguridad, y que va desde Arequipa hasta Imata 100 Km de carretera asfaltada siguiendo la vía Arequipa - Puno, luego de Imata hasta las inmediaciones de Condorama 70 Km por carreta afirmada siguiendo la carretera (también afirmada) que lleva a Tintaya y de Condorama al Proyecto 40 Km por trocha carrozable, lo cual desde Lima suma una distancia total de 1 219 km. A continuación se presenta en la tabla 5 la ruta de acceso al proyecto.

Tabla 5. Vías de acceso del Proyecto – Ruta A y Ruta B.

| Ruta A | Tipo de Vía | Km. |
|-----------------------------------|------------------------|----------------|
| Lima - Juliaca | Vía Aérea | 1290,00 |
| Juliaca- Lampa | Carretera Asfaltada | 33,00 |
| Lampa - Palca - Vilavila – Chivay | Carretera Afirmada | 66,00 |
| Chivay - Proyecto | Trocha Carrozable | 17,00 |
| | Distancia Total | 1405,00 |

| Ruta B | Tipo de Vía | Km. |
|----------------------|-----------------------------|------------|
| Lima - Arequipa | Vía Aérea | 1009,00 |
| Arequipa - Imata | Carretera Asfaltada | 100,00 |
| Imata - Condoroma | Carretera Afirmada | 70,00 |
| Condoroma - Proyecto | Carretera Afirmada - trocha | 40,00 |
| Distancia Total | | 1219,00 |

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental Jessica

2.7.3. Poblados del entorno

El área del proyecto tiene a su alrededor algunos poblados y caseríos de los cuales se muestran en el siguiente tabla 6 con sus distancias respecto al proyecto.

Tabla 6. Cuadro de Distancias a los Centros Poblados más Cercanos.

| Centro Poblado | Distancia Km. |
|-----------------------|----------------------|
| Chacapalca | 5 |
| Hacienda Parina | 10 |
| Vilcamarca | 10 |
| Jatun Ayllu | 10.5 |
| Chivay | 13 |
| Ocuviri | 18 |
| Vilavila | 18 |
| Palca | 23 |

Fuente: Instituto Geográfico Nacional – Carta 31u

2.7.4. Climatología

Las condiciones ambientales en el proyecto están influenciadas principalmente por las condiciones climáticas y orográficas, resaltando el elemento altitudinal, que tiene influencia sobre las precipitaciones, evaporación, humedad relativa y al temperatura.

Las precipitaciones pluviales en el ámbito del estudio son marcadamente estacionales, presentándose durante los meses de verano, es decir entre los meses de enero y marzo, periodo en el cual ocurre más de 75 % de la precipitación total anual.

2.7.5. Geología Local

En el área de estudio se presentan rocas volcánicas terciarias y depósitos cuaternarios. En general el vulcanismo presenta tres fases de actividad, relacionadas con el grupo Tacaza, formación Sillapaca y formación Palca. Las últimas fases volcánicas produjeron erupciones ignimbríticas.

2.7.6. Etapas del proceso minero de estudio

2.7.6.1. Prospección y Exploración

En la etapa de la prospección, se realiza el reconocimiento general de la zona, lo cual consiste en buscar anomalías geológicas en la corteza terrestre, en donde posiblemente pueda ubicarse la existencia de un depósito de mineral. En la primera fase de esta etapa se inicia con la recolección de muestras (roca

y suelo) para luego ser analizados por multielementos ICP (Au + 35 elementos) (ver figura 9).



Figura 9. Muestras de Suelo y Roca

Si los resultados analizados son positivos se realiza la siguiente etapa que es la exploración, donde se realiza un conocimiento detallado del depósito del mineral descubierto en la etapa de prospección, para eso se realiza trabajos de perforación diamantina y sondeos superficiales, que determinaran la cantidad y calidad del mineral del yacimiento (ver figura 10).



Figura 10. Trabajos con perforación diamantina.

2.7.6.2.Extracción y Explotación

Durante esta etapa se extrae el mineral contenido en el yacimiento y de los estériles acompañantes, para eso se utilizan diversos procesos como la aplicación de perforación y de voladura (ver figura 11).



Figura 11. Perforación de taladros, colocación de agentes detonadores.

Una vez extraído el material se procede con el carguío y acarreo hacia los volquetes (ver figura 12), el mineral será transportado a la zona de apilamiento o planta de chancado y el material de desmonte será depositado en el botadero de desmonte tal como se demuestra en la figura 13 y 14.



Figura 12. Carguío de material.



Figura 13. Transporte de mineral o desmante.



Figura 14. Depósito de Desmante.

Después que el mineral haya pasado por el proceso de chancado el mismo se deposita en la zona de depósito de mineral (PAD) , para luego realizar la lixiviación del mineral, que tiene como objeto la extracción de los metales valiosos del mineral, por medio de la lixiviación con una solución de cianuro de sodio, que disuelve dichos metales. La solución cianurada es enviado hacia a la planta Merrill Crowe, donde por proceso físico-químico se recupera el oro,

luego pasa al área de refinería donde se obtiene el producto final (dore) (ver figura 15).



Figura 15. Planta Merrill Crowe.

2.7.6.3.Cierre

Esta etapa se caracteriza por realizar una serie de procesos para rehabilitar las zonas que han sido utilizadas por la minería una vez concluidas todas sus operaciones de exploración y explotación; con la finalidad de que el terreno tenga las mismas características o similares a las que existían antes del desarrollo de la actividad minera.

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se ejecutó en la Empresa Minera Aruntani S.A.C, encargada de las operaciones de explotación a tajo abierto en el proyecto Jessica, en la Unidad Minera Arasi; ubicada en el distrito de Ocuvi, provincia de Lampa, departamento de Puno -Perú. El proceso de pruebas se ejecutó durante el periodo desde Diciembre del 2015 hasta Abril del 2016 en la temporada de avenida (lluvia).

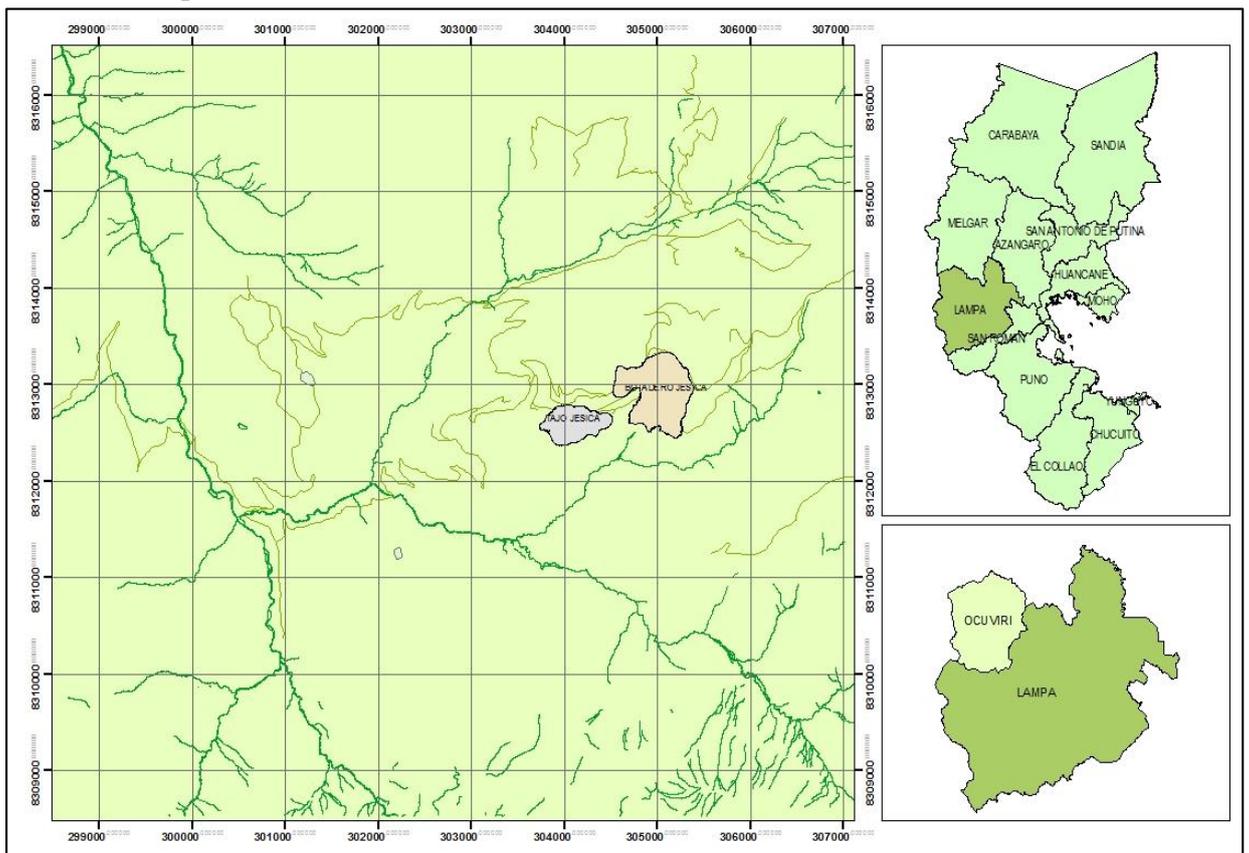


Figura 16. Mapa de ubicación de la zona de estudio (Elaboración propia).

Las coordenadas geográficas de referencia se muestran en la tabla 7:

Tabla 7. Coordenadas geográficas de la zona de estudio.

| Coordenadas UTM (WGS84 – Zona 19) | |
|-----------------------------------|---------|
| Coordenadas este | 0304613 |
| Coordenadas norte | 8312287 |

Fuente: Google Earth 2017

3.2. Materiales e Insumos

Los materiales e insumos utilizados fueron:

3.2.1. Materia Prima

En las Pruebas experimentales se ha utilizado Oxido de Calcio al 78% de pureza, fabricado por la empresa de Cal y Cemento Sur S.A. (Ver Anexo 1).

3.2.2. Reactivos

- Oxido de Calcio (CaO)
- Agua Ácida
- Agua destilada
- Ácido Nítrico

3.2.3. Materiales y Equipos

- Multiparámetro marca HACH HQ 40d
- Vasos precipitados de 500 ml

- Probetas milimetradas de 500 ml y 1000 ml
- Frascos de 1 litro para el muestro de agua ácida
- Erlenmeyer de 500 ml
- Balde de 4 L
- Guantes

3.3. Variables de Estudio

3.3.1. Variables independientes

- Lechada de Cal (ml)

3.3.2. Variables dependientes

- Los Metales totales (mg/l)
- pH (unidad de pH)
- Conductividad Eléctrica (uS/cm)
- Oxígeno Disuelto (mg/l)

3.4. Procedimiento

El procedimiento de trabajo se dividió en cuatro etapas: primero se realizó la medición de caudal y la caracterización del agua ácida (pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y metales totales), la segunda etapa se realizó los ensayos de laboratorio con la neutralización con lechada de cal y análisis de los parámetros físico-químicos e inorgánicos del agua tratada obtenida de los ensayos de laboratorio a un laboratorio externo, en tercer lugar

adecuación del tratamiento con lechada de cal al actual sistema de tratamiento, y por último la cuarta etapa es el análisis de los parámetros físico-químicos e inorgánicos a nivel de campo.

3.4.1. Determinación de Caudal

Se determinó la cantidad de agua que aflora, con la finalidad de determinar si se puede aplicar el sistema de tratamiento con lechada de cal. El método que se utilizó es el volumétrico, debido a que el sistema de captación del actual sistema de tratamiento que cuenta la empresa consta de una tubería HDPE de 4" tal como se muestra en la figura 17.

El afloramiento se ubica en la ladera de la Quebrada Lluchusani, el mismo se encuentra a 30 min de la zona de campamentos de la Unidad Minera Arasi, se utilizó de una de movilidad para poder llegar al punto. La medición del caudal se realizó en la época de avenida con la ayuda de un balde de 4L, el cual consiste el tiempo que se toma en llenarse el agua ácida en el balde. Finalmente los datos obtenidos en campo (volumen y tiempo), serán aplicadas mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{T}$$

Dónde:

Q: Caudal (l/s)

V: Volumen (l)

T: Tiempo (s)

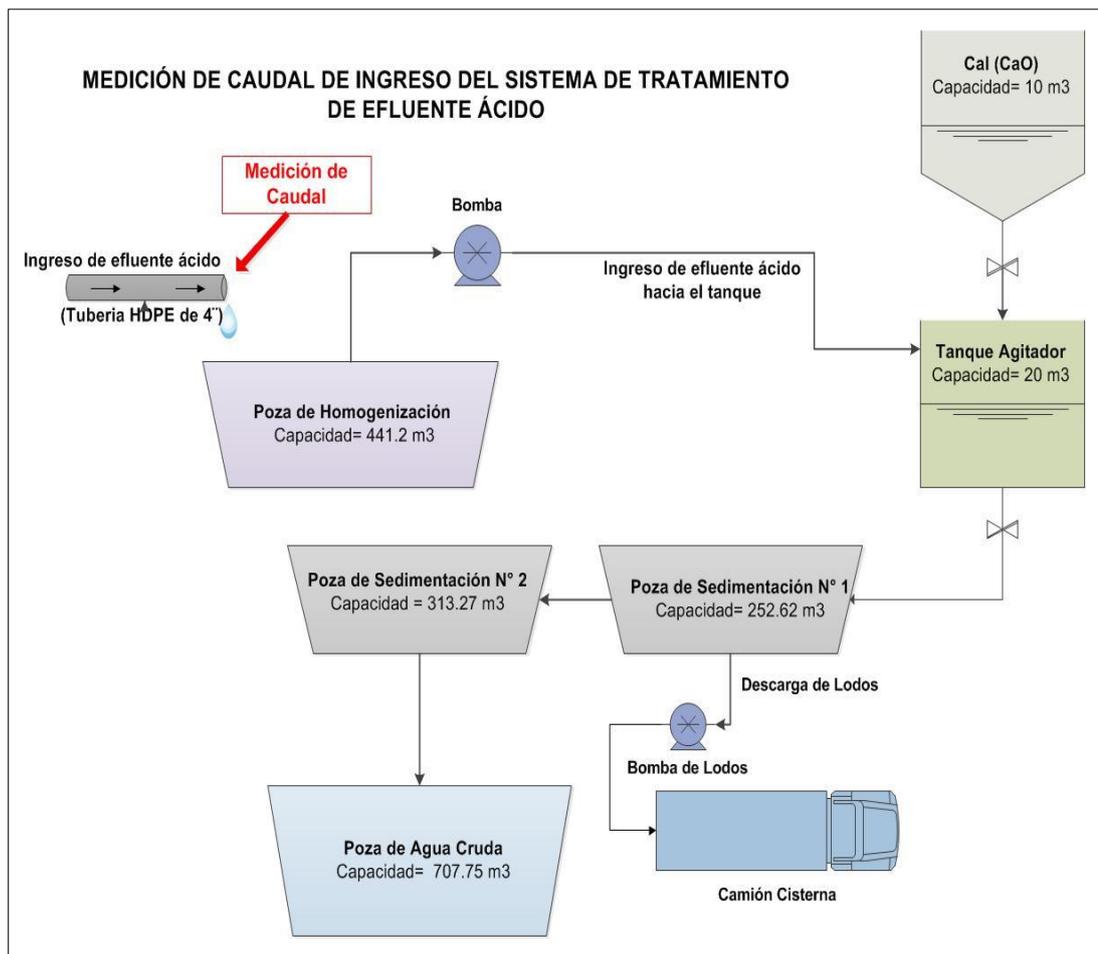


Figura 17. Medición de caudal de efluente ácido.

3.4.2. Caracterización de agua ácida

Se tomaron muestras de 2 litros de agua ácida para analizar parámetros físico-químicos (pH y conductividad eléctrica) en el laboratorio del área de Medio Ambiente de la Empresa Aruntani, utilizando el equipo multiparámetro marca HACH HQ 40d. Para los parámetros inorgánicos (metales totales) presentes en la muestra de agua, se tomaron 1 frascos de 1L y se agregó 20 gotas de ácido nítrico para su preservación, posteriormente el frasco fue enviado a ser analizados por un laboratorio externo certificado por el INACAL.

3.4.3. Pruebas de laboratorio y análisis de agua tratada

Para los ensayos de laboratorio se tomaron 4 litros de agua ácida. Para la preparación de Lechada de Cal se utilizó el reactivo Oxido de Calcio (CaO) fabricado por la empresa Cal y Cemento Sur S.A. El reactivo viene en presentación de polvo. El Óxido de Calcio tiene mayor al 78% de concentración (ver anexo 2). El Óxido de Cal se preparó, pesando 10 gramos y diluirlo en agua destilada, para luego aplicarlo en la muestra de agua ácida.

Los ensayos de neutralización con lechada de cal se realizaron con agitación mecánica en un volumen de 800 ml de muestra. El procedimiento utilizado fue agregar la solución de lechada cal de a pocos a la muestra de agua ácida hasta obtener la estabilización del pH a 6, para esto se utilizó el multiparámetro marca HACH HQ 40d en intervalos para obtención del pH requerido. Una vez el pH estuviera estabilizado y luego de unos minutos se volvió a añadir de

lechada de cal, y se repitió la operación hasta alcanzar un valor de pH dentro de un rango de 7- 8. Luego se colocó la solución obtenida en una probeta milimetrada de 1000 ml, con el fin de que se precipite los hidróxidos metálicos y obtener el agua sobrenadante, para luego ser analizado

Se analizó el agua tratada obtenida de los ensayos de laboratorio, para el caso de los parámetros físico-químicos (pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto) son medidos con el equipo multiparámetro marca HACH HQ 40d en el laboratorio; sin embargo los parámetros inorgánicos son preservados con ácido nítrico y enviados a un laboratorio externo certificado por el INACAL para su análisis correspondiente.

3.4.4. Adecuación del tratamiento activo con lechada de cal al actual sistema de tratamiento

En la actualidad en la mina el sistema de tratamiento se realiza con la preparación de lechada de Cal y la neutralización en un solo tanque, a la cual se añade la cal viva en forma sólida y en tandas de 50 kilos aproximadamente. Luego de aproximadamente 1.5 horas de agitación de la pulpa así neutralizada (pH entre 11 y 12), el tanque es descargado por gravedad a la Poza N° 1 de 252.5 m³ forrada con HDPE, aquí la pulpa sedimenta durante varias horas se tiene una solución clara y con pH de 9, esta se descarga por una válvula hacia la Poza N° 2 de 313.2 m³ para su clarificación que posteriormente pasa hacia la poza de agua cruda por rebose, mediante una bomba en la parte baja de la poza N° 1 se descarga periódicamente el lodo acumulado, este lodo es

recepionado en un camión cisterna que lo transporta hacia la poza de lodos ubicada a unos 100 m en la parte alta, aquí el lodo se consolida cuando pierde el agua por evaporación y filtración (figura 18).

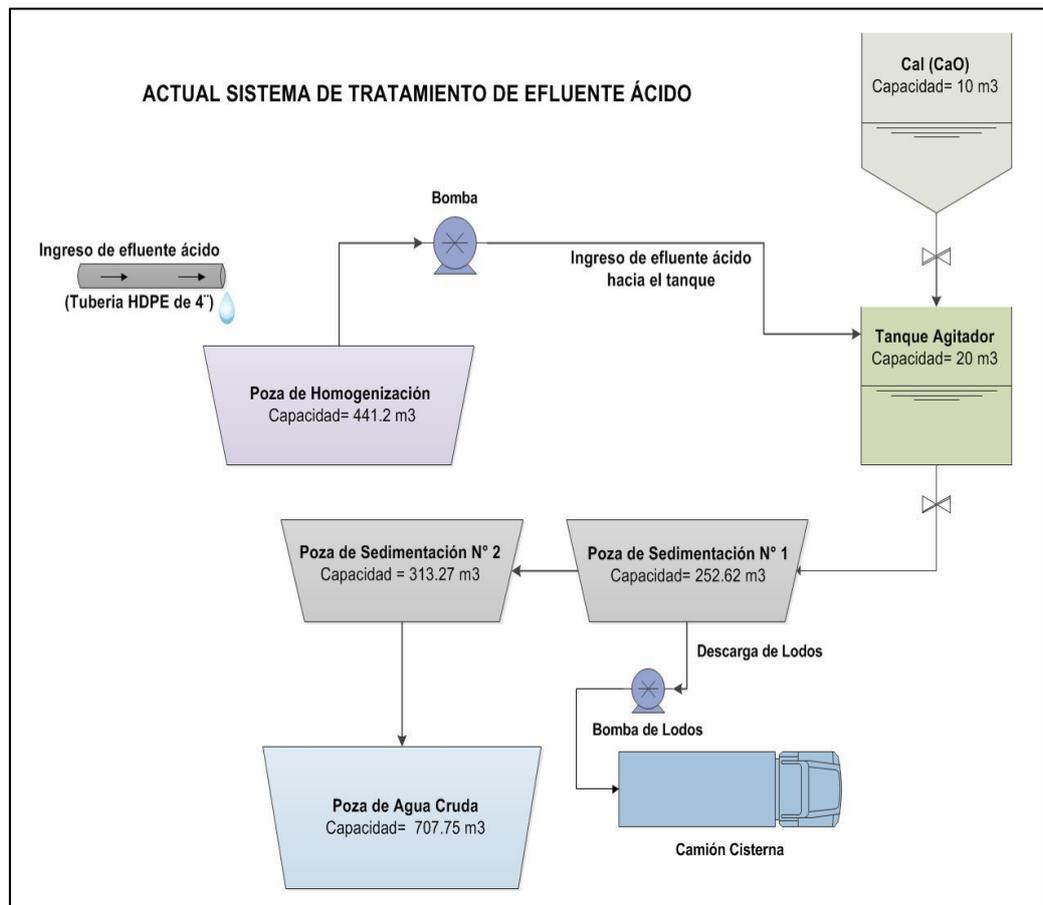


Figura 18. Actual sistema de tratamiento de efluente ácido utilizando cal viva (CaO).

Como resultado del ensayo de neutralización con lechada de Cal ($CaOH_2$) que se aplicó al efluente ácido en el laboratorio, se tendrá agua tratada que posteriormente se mandó a analizar a un laboratorio externo para verificar si los resultados se encuentran por debajo del Estándar de Calidad Ambiental del

Agua – Categoría 3 Bebida de Animales y de los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas. Para la adecuación del nuevo sistema de tratamiento con Lechada de Cal ($CaOH_2$) no se realizó ninguna construcción solo se adecuó al sistema de tratamiento actual, ósea la preparación de la lechada de cal se realizó antes del ingreso hacia el tanque agitador y no en el mismo tal como se realizaba con el anterior sistema. En la figura 19 se muestra el diagrama de la adecuación del sistema de tratamiento.

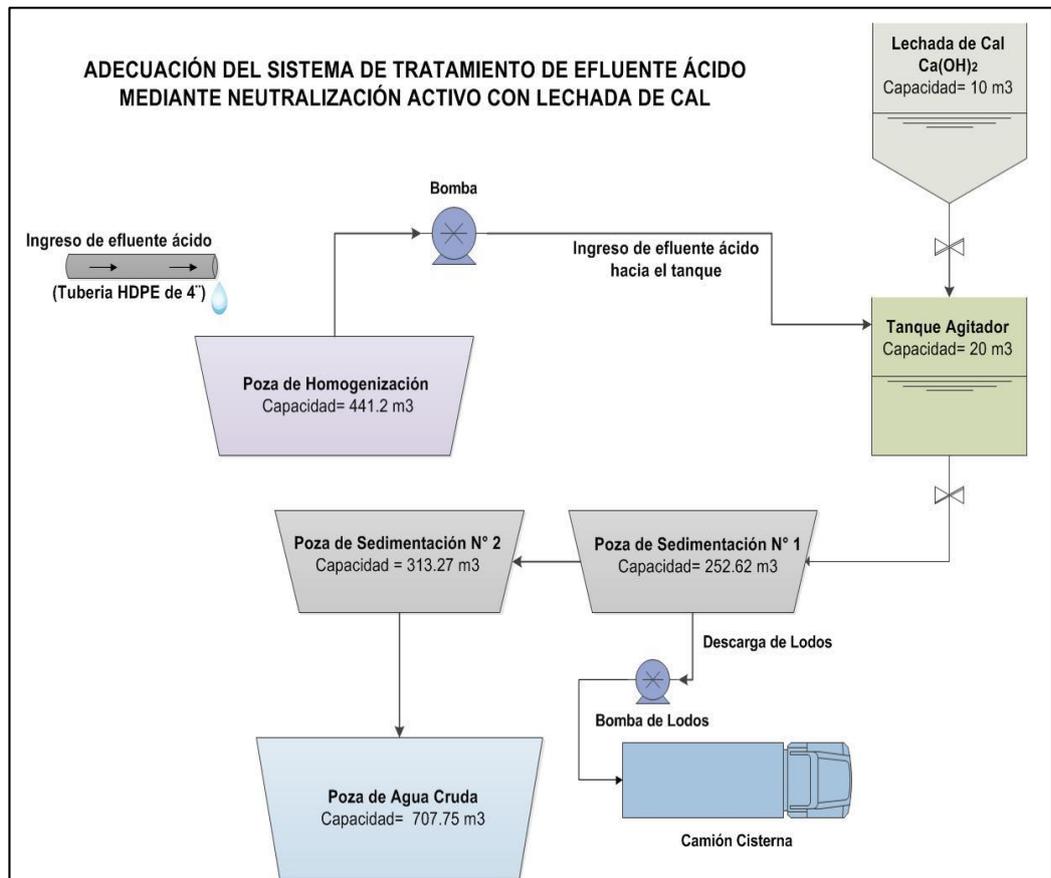


Figura 19. Adecuación del tratamiento activo con lechada de Cal ($CaOH_2$) al actual sistema de tratamiento con cal viva (CaO).

3.4.5. Evaluación de resultados Pre y Post Tratamiento

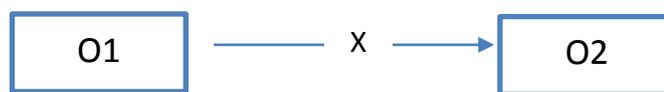
Luego de la adecuación del tratamiento activo mediante lechada de cal, se tomaron muestras de agua de 2L antes y después del tratamiento. Los parámetros físico-químicos (conductividad eléctrica, pH y oxígeno disuelto) fueron analizados en el laboratorio de la empresa usando el multiparametro marca HACH HQ 40d; en el caso de los parámetros inorgánicos (metales totales) se tomaron en 1 frascos de 1L para la muestra de agua antes del tratamiento y 1 frasco de 1L para la muestra de agua después del tratamiento, luego se agregó 20 gotas de ácido nítrico para su preservación, posteriormente los frascos fueron etiquetados y enviados para su respectivo análisis a un laboratorio externo certificado por el INACAL.

3.5. Tipo y Diseño de la investigación

El presente trabajo es de tipo experimental por que se relaciona la eficiencia de la variable independiente (lechada de cal), en la presencia de las aguas ácidas de mina, sobre la variable dependiente (parámetros físico-químicos e inorgánicos de aguas ácidas). Avila, (2006) menciona que la investigación experimental tiene como propósito evaluar los cambios que se manifiestan en la variable dependiente cuando se introduce la variable independiente.

La investigación es pre-experimental con diseño pre-test y post-test de un solo grupo, debido que se realiza pruebas antes del tratamiento de aguas ácidas mediante neutralización activo con lechada de cal y después de la

aplicación del mismo. Campbell & Stanley, (1966) indica que en este diseño se efectúa una prueba antes de introducir la variable independiente (O1) y otra después de su aplicación (O2); si la prueba se administrará antes de la introducción de la variable independiente se le denomina pretest y si se administra después entonces se llama postest.



3.6. Formulación de Hipótesis

- **H_o :** Existe remoción de los parámetros físico-químicos e inorgánicos mediante un sistema de tratamiento por neutralización utilizando lechada de cal ($Ca(OH)_2$).
- **H_a :** No existe remoción de los parámetros físico- químico e inorgánico mediante un sistema de tratamiento por neutralización utilizando lechada de cal ($Ca(OH)_2$).

3.7. Análisis de Datos

El análisis de los datos de la investigación se basó en las diferencias numéricas que se obtuvieron antes y después del tratamiento de aguas ácidas mediante neutralización activo con lechada de cal, en los metales que tienen un valor máximo establecido en las normas (ECA de agua y LMP's).

Asimismo se aplicó la estadística inferencial para contrastar la hipótesis mediante la prueba T de Student a un intervalo de confianza de 95%. Sin embargo Sánchez, (2015) menciona que para el crucial desarrollo de la prueba T-Student, los datos de las muestras deben tener una distribución normal. Para ello se verificó la normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk para muestras pequeñas menores a 50 individuos, en sus diferencias pre-test y post-test tratamiento.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Determinación del caudal

Se determinó la cantidad de afloramiento ácido que ingresa al actual sistema de tratamiento que tiene la empresa mediante el método volumétrico tal como se muestran en la tabla 8. Skousen & Ziemkiewicz (1996) indican que el uso de la cal hidratada para el tratamiento de drenaje ácidos es rentable en situaciones de gran caudal y alta acidez.

Tabla 8. Cantidad de caudal del drenaje ácido.

| Código | Descripción | Caudales (L/s) | |
|------------------------------|----------------------------|----------------|---------|
| | | Estiaje | Lluvias |
| A | drenaje bajo la desmontera | 1.07* | 2.37* |
| B | drenaje bajo la desmontera | 0.72* | 1.0* |
| Efluente Acido Global | | 1.79 | 3.37 |

* Calculado por el método volumétrico

4.2. Ensayos de Laboratorio

4.2.1. Caracterización físico –química e inorgánico de aguas ácidas de mina

Aduvire (2006) indica que antes de elegir un sistema de tratamiento, se debe proceder a su caracterización geoquímica (pH, oxígeno disuelto, conductividad, metales totales y otros). Por lo tanto se procedió a realizar la caracterización de las aguas ácidas de mina del Botadero Jessica antes de utilizar el tratamiento activo mediante el uso de lechada de cal.

En la tabla 9 se muestra que el valor del parámetro de la conductividad es alto siendo de 1510 mS/cm; sin embargo el pH tiene un bajo valor de 3.02; según Lottermoser (2007) la elevada conductividad y el bajo valor de pH, se debe a las reacciones químicas que se produce por la exposición de los sulfuros a la

atmosfera (oxígeno y agua), también López et al., (2002) indica que los iones de hidrógeno que se generan en la oxidación e hidrolisis de los metales aportan en bajar el pH del agua. Además un efluente de carácter ácido ($\text{pH} < 4$), no es adecuado en la naturaleza, debido a que altera, perturba o inhibe los procesos biológicos y químicos que se llevan a cabo, resultando un daño perjudicial en el ecosistema, como la contaminación hídrica (Baquero et. al, 2008).

En el caso de los parámetros inorgánicos, se muestra en la tabla 10 los valores de algunos parámetros son relativamente altos a comparación con los valores que se deben cumplir en los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua D.S N°015-2015-MINAM y los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N°010-2010-MINAM, sin embargo Durkin & Herrmann (1994) indican que la presencia de estos metales en el cuerpo de agua, es debido que un pH bajo es capaz de solubilizar los metales contenidos en la roca residual.

En conclusión, el análisis de la muestra de agua ácida de mina nos indica que se presencia altas concentraciones en los metales pesados y una elevada acidez, por consiguiente nos permite demostrar que es necesario aplicar un tratamiento previo antes de la evacuación al medio ambiente.

Tabla 9. Resultados de análisis físico – Químicos

| Parámetro | Símbolo | Unidad | Valor | ECA de Agua ¹ | LMP's ² |
|------------------|---------|---------------|-----------|--------------------------|--------------------|
| Conductividad | C | mS/cm o uS/cm | 14.87(mS) | 5000 (uS) | ** |
| pH | pH | Unidades pH | 1.29 | 6.5 – 8.4 | 6 – 9 |
| Oxígeno Disuelto | OD | mg/L | 2.18 | 5 | ** |

¹ Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua D.S N°015-2015-MINAM, Categoría 3 – Bebida de Animales

² Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento

** No presenta valor en ese parámetro

Tabla 10. Resultados de los análisis químicos de metales pesados.

| Parámetro | Símbolo | Unidad | Valor | ECA de Agua ¹ | LMP's ² |
|-----------|---------|--------|----------|--------------------------|--------------------|
| Aluminio | Al | mg/L | 1963 | 5 | ** |
| Antimonio | Sb | mg/L | < 0.006 | ** | ** |
| Arsénico | As | mg/L | < 0.010 | 0.2 | 0.1 |
| Bario | Ba | mg/L | 0.046 | ** | ** |
| Berilio | Be | mg/L | 0.305 | 0.1 | ** |
| Bismuto | Bi | mg/L | < 0.031 | ** | ** |
| Boro | B | mg/L | 5.515 | 5 | ** |
| Cadmio | Cd | mg/L | 0.279 | 0.05 | 0.05 |
| Calcio | Ca | mg/L | 417.0 | ** | ** |
| Cobalto | Co | mg/L | 8.547 | 1 | ** |
| Cobre | Cu | mg/L | 33.87 | 0.5 | ** |
| Cromo | Cr | mg/L | 1.975 | 1 | 0.5 |
| Estaño | Sn | mg/L | < 0.044 | ** | ** |
| Estroncio | Sr | mg/L | 0.477 | ** | ** |
| Fosforo | P | mg/L | 90,94 | ** | ** |
| Hierro | Fe | mg/L | 5216 | ** | ** |
| Litio | Li | mg/L | < 0.040 | 2.5 | ** |
| Magnesio | Mg | mg/L | 665.6 | 250 | ** |
| Manganeso | Mn | mg/L | 115.9 | 0.2 | ** |
| Mercurio | Hg | mg/L | < 0.0001 | 0.001 | 0.002 |
| Molibdeno | Mo | mg/L | < 0.018 | ** | ** |
| Níquel | Ni | mg/L | 12.39 | 1 | ** |
| Plata | Ag | mg/L | < 0.010 | ** | ** |

| | | | | | |
|---------|----|------|---------|------|-----|
| Plomo | Pb | mg/L | 0.008 | 0.05 | 0.2 |
| Potasio | K | mg/L | < 0.70 | ** | ** |
| Selenio | Se | mg/L | 0.010 | 0.05 | ** |
| Silicio | Si | mg/L | 91.11 | ** | ** |
| Sodio | Na | mg/L | 17.95 | ** | ** |
| Talio | Tl | mg/L | < 0.040 | ** | ** |
| Vanadio | V | mg/L | 1.258 | ** | ** |
| Zinc | Zn | mg/L | 46.97 | 24 | 1.5 |

¹ Estándar Nacionales de Calidad Ambiental para Agua D.S N° 015-2015-MINAM, Categoría 3 – Bebida de Animales

² Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento

** No presenta valor en ese parámetro

4.2.2. Resultado y Análisis de agua tratada de ensayo de laboratorio

Al comparar los resultados de los análisis del agua sin el tratamiento con los realizados en la prueba de laboratorio con lechada de cal, se evidencia una efectiva remoción en los parámetros inorgánicos que presentan elevada concentración (tabla 11), tales como Aluminio (Al), Bario (Ba), Berilio (Be), Boro (B), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo(Cr), Fosforo (P), Hierro (Fe), Magnesio (Mg), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni), Silicio (Si) y Zinc (Zn), gran parte de estos elementos son considerados los más importantes contaminantes ambientales, ocasionando daños a la salud de las personas y demás seres vivos; también se presenta una elevación en los parámetros físico-químicos (tabla 12), como el valor del pH pasando de 3.01 mg/l a 8.35 mg/l; en el caso de la conductividad el agua sin tratar es de 1510 uS/cm y después de 9190 uS/cm, esto es debido a que en la muestra de agua tratada se presenció una considerable cantidad de solidos disueltos, provocando así una elevada conductividad.

Tabla 11. Resultados de parámetros físico – químicos.

| Parámetro | Unidad | Agua Sin Tratar | Agua Tratada con Lechada de Cal | ECA de Agua ¹ | LMP's ² |
|-------------------------|--------------|-----------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------|
| Conductividad Eléctrica | uS/cm | 1510 | 9190 | 5000 | ** |
| pH | Unidad de pH | 3.01 | 8.35 | 6.5 - 8.4 | 6 - 9 |

¹ Estándar de Calidad Ambiental de Agua D.S N° 015-2015-MINAM, Categoría 3 – Bebida de Animales

² Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento

** No presenta valor en ese parámetro

Tabla 12. Resultados de parámetros inorgánicos utilizando lechada de cal.

| Parámetro | Símbolo | Unidad | Agua Sin Tratar (mg/l) | Agua Tratada con Lechada de Cal (mg/l) | % de Remoción | % no Removido |
|-----------|---------|--------|------------------------|--|---------------|---------------|
| Aluminio | Al | mg/L | 549.8 | 0.396 | 99.99 | 0.01 |
| Antimonio | Sb | mg/L | < 0.006 | < 0.006 | 0 | 100 |
| Arsénico | As | mg/L | < 0.010 | < 0.010 | 0 | 100 |
| Bario | Ba | mg/L | 0.036 | 0.063 | 0 | 100 |
| Berilio | Be | mg/L | 0.076 | <0.001 | 98.7 | 1.3 |
| Bismuto | Bi | mg/L | < 0.031 | < 0.031 | 0 | 100 |
| Boro | B | mg/L | 0.72 | 0.01 | 98.6 | 1.4 |
| Cadmio | Cd | mg/L | 0.134 | 0.003 | 97.8 | 2.2 |
| Calcio | Ca | mg/L | 377.9 | 770.5 | 0 | 100 |
| Cobalto | Co | mg/L | 2.214 | < 0.007 | 99.7 | 0.3 |
| Cobre | Cu | mg/L | 16.82 | 0.015 | 99.9 | 0.1 |
| Cromo | Cr | mg/L | 0.446 | < 0.009 | 98 | 2 |
| Estaño | Sn | mg/L | < 0.044 | < 0.044 | 0 | 100 |
| Estroncio | Sr | mg/L | 0.560 | 0.675 | 0 | 100 |
| Fosforo | P | mg/L | 10.53 | < 0.15 | 98.6 | 1.4 |
| Hierro | Fe | mg/L | 923.5 | 0.105 | 99.99 | 0.01 |
| Litio | Li | mg/L | < 0.040 | 0.073 | 0 | 100 |
| Magnesio | Mg | mg/L | 174.3 | 76.33 | 22.1 | 77.9 |
| Manganeso | Mn | mg/L | 30.18 | 0.635 | 97.9 | 2.1 |
| Molibdeno | Mo | mg/L | < 0.018 | < 0.018 | 0 | 100 |
| Níquel | Ni | mg/L | 3.208 | < 0.002 | 99.9 | 0.1 |
| Plata | Ag | mg/L | < 0.010 | < 0.010 | 0 | 100 |

| | | | | | | |
|---------|----|------|---------|---------|------|------|
| Plomo | Pb | mg/L | < 0.008 | < 0.008 | 0 | 100 |
| Potasio | K | mg/L | 2.65 | 29.44 | 0 | 100 |
| Selenio | Se | mg/L | < 0.010 | < 0.010 | 0 | 100 |
| Silicio | Si | mg/L | 39.16 | 0.763 | 98 | 2 |
| Sodio | Na | mg/L | 18.88 | 18.42 | 0 | 100 |
| Talio | Tl | mg/L | < 0,040 | < 0,040 | 0 | 100 |
| Titanio | Ti | mg/L | < 0.030 | < 0.030 | 0 | 100 |
| Vanadio | V | mg/L | 0.110 | 0.021 | 76.4 | 23.6 |
| Zinc | Zn | mg/L | 12.98 | 0.022 | 99.8 | 0.2 |

La muestra de agua sin tratar y tratada fueron analizados por el laboratorio Corporación Laboratorios Ambientales del Perú (CORPLAB) acreditado por el Organismo Peruano de Acreditación INACAL-DA con registro N° LE-029 en el informe N° 13199/2016. Sin embargo los parámetros físico-químicos (conductividad y pH) fueron analizados en el Laboratorio de Medio Ambiente de la empresa Aruntani S.A.C (anexo 2).

Se muestra en la tabla 13, 14, 15 y 16 la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio con el ECA de Agua y LMP's, donde se observa que todos los parámetros inorgánicos cumplen con las normativas, a excepción del manganeso que sobrepasa 0.4 mg/l del valor establecido en el Estándar de Calidad Ambiental de Agua D.S N° 015-2015-MINAM, Categoría 3 – Bebida de Animales siendo un valor límite de 0.2 mg/l.

Tabla 13. Comparación de los parámetros inorgánicos con ECA de Agua y LMP's.

| Clave | Concentración (mg/l) | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------|---------|---------|-------|--------|---------|------|-------|
| | Al | Sb | As | Ba | Be | Bi | B | Cd |
| Agua sin Tratar | 549.8 | < 0.006 | < 0.010 | 0.036 | 0.076 | < 0.031 | 0.72 | 0.134 |
| Agua Tratada con lechada de Cal | 0.396 | < 0.006 | < 0.010 | 0.063 | <0.001 | < 0.031 | 0.01 | 0.003 |
| ECA de Agua ¹ | 5 | ** | 0.2 | ** | 0.1 | ** | 5 | 0.05 |
| LMP's ² | ** | ** | 0.1 | ** | ** | ** | ** | 0.05 |

¹ Estándar de Calidad Ambiental de Agua D.S N° 015-2015-MINAM, Categoría 3 – Bebida de Animales

² Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento

** No presenta valor en ese parámetro

Tabla 14. Comparación de los parámetros inorgánicos con ECA de Agua y LMP's.

| Clave | Concentración (mg/l) | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------|---------|-------|---------|---------|-------|--------|-------|
| | Ca | Co | Cu | Cr | Sn | Sr | P | Fe |
| Agua sin Tratar | 377.9 | 2.214 | 16.82 | 0.446 | < 0.044 | 0.56 | 10.53 | 923.5 |
| Agua Tratada con lechada de Cal | 770.5 | < 0.007 | 0.015 | < 0.009 | < 0.044 | 0.675 | < 0.15 | 0.105 |
| ECA de Agua ¹ | ** | 1 | 0.5 | 1 | ** | ** | ** | ** |
| LMP's ² | ** | ** | ** | 0.5 | ** | ** | ** | ** |

¹ Estándar de Calidad Ambiental de Agua D.S N° 015-2015-MINAM, Categoría 3 – Bebida de Animales

² Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento

** No presenta valor en ese parámetro

Tabla 15. Comparación de los parámetros inorgánicos con ECA de Agua y LMP's.

| Clave | Concentración (mg/l) | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|-------|
| | Li | Mg | Mn | Mo | Ni | Ag | Pb | K |
| Agua sin Tratar | < 0.040 | 174.3 | 30.18 | < 0.018 | 3.208 | < 0.010 | < 0.008 | 2.65 |
| Agua Tratada con lechada de Cal | 0.073 | 76.33 | 0.635 | < 0.018 | < 0.002 | < 0.010 | < 0.008 | 29.44 |
| ECA de Agua | 2.5 | 250 | 0.2 | ** | 1 | ** | 0.05 | ** |
| LMP | ** | ** | ** | ** | ** | ** | 0.2 | ** |

¹ Estándar de Calidad Ambiental de Agua D.S N° 015-2015-MINAM, Categoría 3 – Bebida de Animales

² Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento

** No presenta valor en ese parámetro

Tabla 16. Comparación de los parámetros inorgánicos con ECA de Agua y LMP's.

| Clave | Concentración (mg/l) | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------|-------|-------|---------|---------|-------|-------|
| | Se | Si | Na | Tl | Ti | V | Zn |
| Agua sin Tratar | < 0.010 | 39.16 | 18.88 | < 0,040 | < 0.030 | 0.11 | 12.98 |
| Agua Tratada con lechada de Cal | < 0.010 | 0.763 | 18.42 | < 0,040 | < 0.030 | 0.021 | 0.022 |
| ECA de Agua | 0.05 | ** | ** | ** | ** | ** | 24 |
| LMP | ** | ** | ** | ** | ** | ** | 1.5 |

¹ Estándar de Calidad Ambiental de Agua D.S N° 015-2015-MINAM, Categoría 3 – Bebida de Animales

² Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento

** No presenta valor en ese parámetro

4.2.3. Adecuación del tratamiento activo con lechada de cal al actual sistema de tratamiento

Lo resultados de los ensayos de laboratorio adicionando un agente alcalino como la lechada de cal, nos evidencia una efectiva remoción en los parámetros físico-químicos e inorgánicos, debido que al elevar el nivel pH de la solución, la mayoría de los iones de metales solubles precipitan fácilmente. Por lo tanto el uso de lechada de cal no solo garantizará elevar el pH, sino también una reducción de las concentraciones de metales pesados. Además los resultados del agua tratada se

encuentran dentro de los valores establecidos por el Estándar de Calidad de Agua, Categoría 3 – Bebida de animales y Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM - Limite en cualquier momento; entonces al ser eficiente el sistema de tratamiento mediante lechada de Cal, se adecua el mismo al actual sistema de tratamiento.

4.3. Análisis de resultados Pre – Post Tratamiento

A continuación se muestra en las tablas 17 y 18 los resultados de los análisis físico-químicos e inorgánicos pre – post tratamiento, aplicando el sistema de tratamiento mediante neutralización activo con lechada de cal a nivel de campo.

El análisis de las muestra de agua pre y post fueron analizados por el laboratorio Corporación Laboratorios Ambientales del Perú (CORPLAB) acreditado por el Organismo Peruano de Acreditación INACAL-DA con registro N° LE-029 en el informe N° 1122/2016. Sin embargo los parámetros físico-químicos (conductividad y pH) fueron analizados en el Laboratorio de Medio Ambiente de la empresa Aruntani S.A.C (anexo 3).

Tabla 17. Resultados de parámetros físico-químicos pre y post Tratamiento.

| Parámetros físicos – químicos | Pre - Análisis | Post - Análisis |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Conductividad (mS/cm) | 14.87 | 3.14 |
| Oxígeno Disuelto (mg/l) | 1.29 | 5.54 |
| pH | 2.18 | 8.1 |

Tabla 18. Resultados de parámetros inorgánicos Pre y Post tratamiento.

| Parámetros Inorgánicos | Pre - Análisis | Post - Análisis | Cantidad de Remoción | No removido | Eficiencia de Remoción (%) | % no removido |
|------------------------|----------------|-----------------|----------------------|-------------|----------------------------|---------------|
| Aluminio (mg/l) | 1963 | 0.769 | 1962 | 0.769 | 99.96 | 0.039 |
| Arsénico (mg/l) | 0.010 | 0.010 | 0 | 0.010 | 0.0 | 100.0 |
| Berilio (mg/l) | 0.305 | 0.001 | 0 | 0.001 | 99.7 | 0.3 |
| Boro (mg/l) | 5.515 | 0.010 | 6 | 0.010 | 99.8 | 0.2 |
| Cadmio (mg/l) | 0.279 | 0.003 | 0 | 0.003 | 98.9 | 1.1 |
| Cobalto (mg/l) | 8.547 | 0.009 | 9 | 0.009 | 99.9 | 0.1 |
| Cobre (mg/l) | 33.87 | 0.018 | 34 | 0.018 | 99.9 | 0.1 |
| Cromo (mg/l) | 1.975 | 0.009 | 2 | 0.009 | 99.5 | 0.5 |
| Hierro (mg/l) | 5216 | 0.893 | 5215 | 0.893 | 99.98 | 0.02 |
| Magnesio (mg/l) | 665.6 | 109.5 | 556 | 109.5 | 83.5 | 16.5 |
| Manganeso (mg/l) | 115.9 | 1.484 | 114 | 1.484 | 98.7 | 1.3 |
| Níquel (mg/l) | 12.39 | 0.012 | 12 | 0.012 | 99.9 | 0.1 |
| Plomo (mg/l) | 0.008 | 0.008 | 0 | 0.008 | 0.0 | 100.0 |
| Selenio (mg/l) | 0.010 | 0.010 | 0 | 0.010 | 0.0 | 100.0 |
| Zinc (mg/l) | 46.97 | 0.022 | 47 | 0.022 | 99.95 | 0.05 |

4.3.1. Parámetros Físico químicos

4.3.1.1 Conductividad

El agua ácida de mina ingreso con una conductividad de 14.87 mS/cm y a la salida del sistema de tratamiento se redujo a 3.14 mS/cm, el porcentaje de remoción fue de 11.73 mS/cm (tabla 17). La alta concentración de conductividad nos indica la cantidad de iones disueltos contenidos en el agua, sin embargo al añadir un compuesto básico a una solución ácida, destruye todas las propiedades características de la solución ácida (Jiménez, 2001).

El resultado del parámetro de conductividad obtenido a la salida del sistema de tratamiento fue de 3.14 mS/cm, cumple así el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 5000 μ S/cm (figura 20).

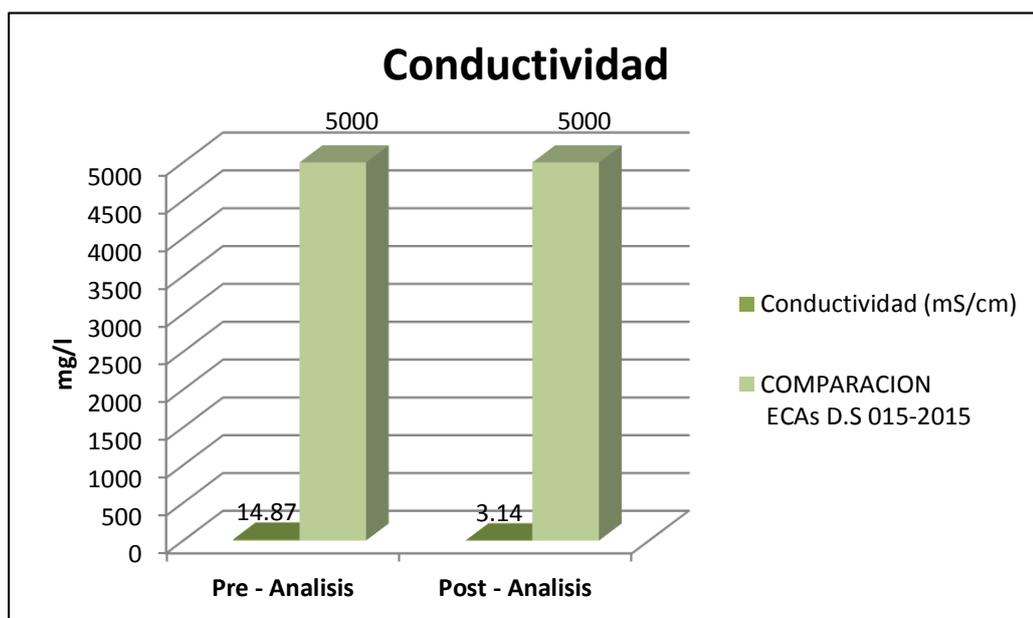


Figura 20. Comparación del parámetro Conductividad antes y después del tratamiento con norma.

▪ Prueba de normalidad

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 19. Prueba de normalidad de Conductividad pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Conductividad Pre | ,104 | 20 | ,200 | ,983 | 20 | ,969 |
| Conductividad Post | ,104 | 20 | ,200 | ,943 | 20 | ,276 |

La tabla 19 muestra que la significancia del reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de conductividad pre (0.173) y post (0.998) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T-Student.

▪ Prueba de hipótesis T-Student

Hipótesis

H_0 : Los datos de conductividad obtenidos después del tratamiento de aguas ácidas con lechada de Cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de conductividad obtenidos después del tratamiento de aguas ácidas con lechada de Cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 20. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de Conductividad.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | t | gl | sig. (bilateral) |
|--|-------------------------|---------------------|----------------------|--|----------|---------|----|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | |
| Par 1 Conductividad Pre Conductividad Post | 11.678 00 | 1.33273 | .29801 | 11.05426 | 12.30174 | 39, 187 | 19 | ,000 |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas ácidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de conductividad obtenidos después del tratamiento de aguas ácidas con lechada de Cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de conductividad es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 11.67800 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 11.05426 y 12.30174. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.1.2.pH

Se muestra en la tabla 17 diferencia en los valores presentados en el parámetro de pH, siendo un valor de pH 2.18 en el ingreso hacia el sistema de tratamiento,

según y a la salida aumentó a un pH 8.1. Según Ramalho, (2003) considera apto un pH entre 6.5 y 8.5, debido que asegura actividad biológica en el agua.

La elevación de pH a la salida del tratamiento, se debe que al añadir la lechada de cal ($Ca(OH)_2$) se disuelve, aportando iones de calcio que son absorbidos por las superficies de los minerales (Hassibi & Singh, 2014). Estos minerales al ser absorbidos por el agente neutralizante (lechada de cal), disminuyen la concentración de iones de hidrógenos que se produce por la oxidación de estos minerales (J. G. Skousen, 2002), por consiguiente el exceso de neutralizante provoca la elevación del pH y la precipitación de los minerales (metales pesados)(Baquero et al., 2008).

Asimismo el resultado obtenido después de aplicado el tratamiento mediante neutralización activo con lechada de cal cumple con el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un rango de 6.5 – 8.4 unidad de pH (figura 21) y también cumple el valor establecido con Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento que considera un rango de 6 – 9 (figura 22)

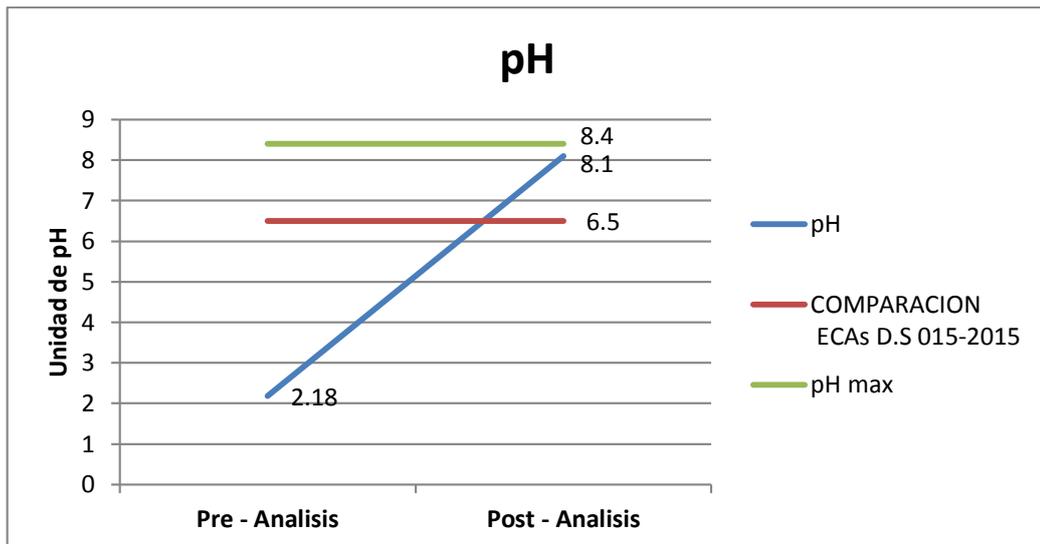


Figura 21. Comparación del parámetro Conductividad antes y después del tratamiento con ECA de agua.

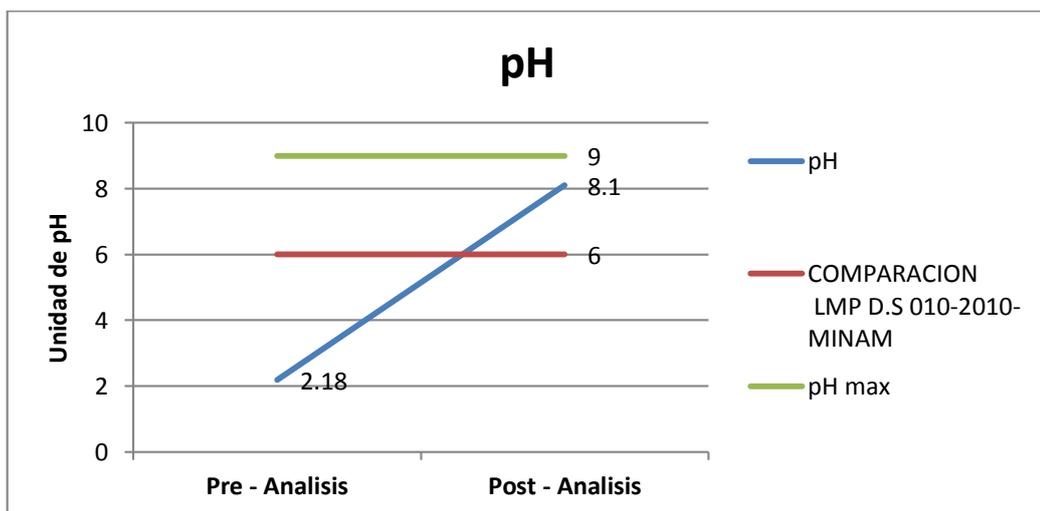


Figura 22. Comparación del parámetro Conductividad antes y después del tratamiento con LMP's.

▪ **Prueba de Normalidad**

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 21. Prueba de normalidad de pH pre y post tratamiento.

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| pH Pre | ,138 | 20 | ,200 | ,933 | 20 | ,173 |
| pH Post | ,082 | 20 | ,200 | ,990 | 20 | ,998 |

La tabla 21 muestra que la significancia del reporte de Shapiro- Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de pH pre (0.173) y post (0.998) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T-Sudent

▪ Prueba de hipótesis T-Student

Hipótesis

H_0 : Los datos de pH obtenidos después del tratamiento de aguas ácidas con lechada de Cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de pH obtenidos después del tratamiento de aguas ácidas con lechada de Cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 22. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de pH.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | | t | gl | sig. (bilateral) |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|----------|---------|----|------|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | | |
| Par 1 pH Pre pH Post | -5.40000 | .66376 | .14842 | -5.71065 | -5.08935 | -36,383 | 19 | ,000 | |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas ácidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de pH obtenidos después del tratamiento de aguas ácidas con lechada de Cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de pH es mayor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de -5.40000 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores -5.71065 y -5.08935. Como se

observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.1.3. Oxígeno Disuelto

Se presenta valores diferentes antes y después de aplicar el tratamiento con la lechada de cal para el parámetro de oxígeno disuelto (tabla 17), el agua ácida presentó un valor de 1.29 mg/l y luego de aplicado el tratamiento se obtuvo 5.54 mg/l. Aduvire (2006) señala que los drenajes ácidos de mina contiene poco oxígeno disuelto. La reducción significativa del oxígeno disuelto se debe a la presencia de contaminantes en el agua (Ramalho, 2003), como consecuencia de ello provoca la mortandad del medio acuático (Smith & Smith, 2007); por el contrario si el OD aumenta, la velocidad del crecimiento microbiano también lo hace (Delgadillo, Camacho, Perez, & Andrade, 2010). Además Aduvire (2006) indica que disminuye la cantidad de oxígeno disuelto presente en el agua es por la oxidación del ion férrico, sin embargo al añadir un agente neutralizante se inhibe este proceso y ayuda a aumentar el oxígeno disuelto.

El Oxígeno disuelto obtenido a la salida del sistema de tratamiento cumple con el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 5 mg/l (figura 23).

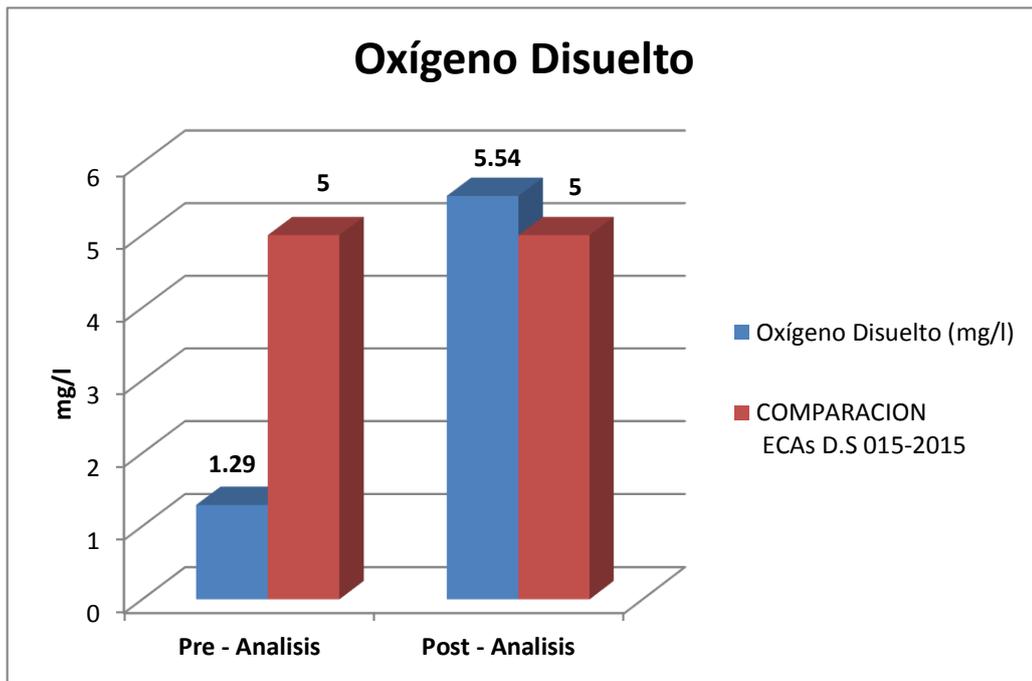


Figura 23. Comparación del parámetro oxígeno disuelto antes y después del tratamiento con norma.

▪ Prueba de Normalidad

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 23. Prueba de normalidad de oxígeno disuelto pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|-----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Oxígeno Disuelto Pre | ,147 | 20 | ,200 | ,947 | 20 | ,320 |
| Oxígeno Disuelto Post | ,092 | 20 | ,200 | ,966 | 20 | ,672 |

La tabla 23 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de oxígeno disuelto pre (0.320) y post (0.672) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ Prueba de hipótesis T-Student

Hipótesis

H_0 : Los datos de Oxígeno Disuelto obtenidos después del tratamiento de aguas ácidas con lechada de Cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de Oxígeno Disuelto obtenidos después del tratamiento de aguas ácidas con lechada de Cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 24. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de oxígeno disuelto

| Prueba de Muestras Relacionadas | Media | Desviación estándar | Media error estándar | Diferencias emparejadas | | t | gl | sig. (bilateral) |
|--|----------|---------------------|----------------------|--|----------|---------|----|------------------|
| | | | | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | |
| Par 1 Oxígeno Disuelto Pre Oxígeno Disuelto Post | -4.38800 | .68624 | .15345 | -4.70917 | -4.06683 | -28,596 | 19 | ,000 |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis “Los datos de Oxígeno Disuelto obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de Cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento”, lo que demuestra que el valor del parámetro de Oxígeno Disuelto es mayor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de -4.38800 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores -4.70917 y -4.06683 . Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2. Parámetros Inorgánicos

4.3.2.1. Aluminio

La muestra de agua ácida contenía un valor de aluminio de 1963 mg/l en el ingreso al sistema de tratamiento y a la salida se redujo a un valor de 0.769 mg/l.; por lo tanto la remoción de este parámetro fue de 99.96% (tabla 18).

Las altas concentraciones de aluminio se presentan en aguas ácidas (Bianchini, 2006), y se da por la oxidación de los minerales de sulfuro que provocan la liberación del metal traza (aluminio) (J. Skousen et al., 1998), generalmente forman hidróxido de aluminio (J. G. Skousen, 2002). La precipitación del hidróxido de aluminio se ve regulado por la solubilidad, a pH inferiores a 4 es altamente soluble y la concentración es mucho más alta; sin embargo en pH entre 5 y 8 es altamente insolubles y la concentración baja (Aduvire, 2006), pero se vuelve a ser soluble a un pH superior a 8.5 (Chavez, Luna, & Oscar, 2014). Por lo tanto, al agregar el agente neutralizante (lechada de cal) el pH se eleva a 8.1 y provoca la precipitación del aluminio de manera que reduce la concentración, Del Águila (2015) confirma experimentalmente la precipitación del aluminio en un rango de pH de 7 a 8. La cantidad de aluminio presente a la salida del tratamiento se encuentra por debajo del valor establecido en el Estándar Nacional de Calidad Ambiental (ECA) para Agua D.S 015-2015.MINAM – Categoría 3 (Bebida de Animales), que considera un valor de 5mg/l (figura 24).

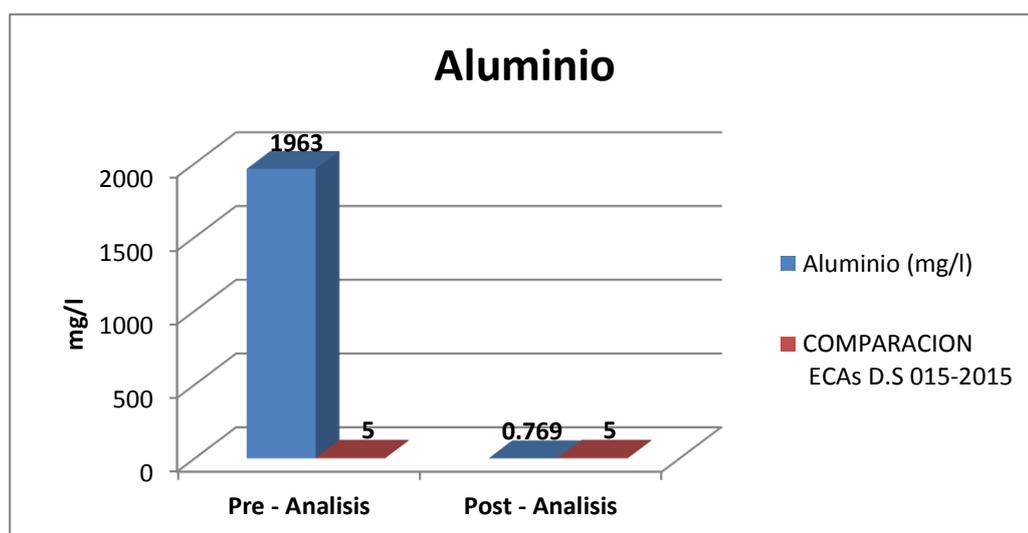


Figura 24. Comparación del parámetro aluminio antes y después del tratamiento con norma.

▪ **Prueba de Normalidad**

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 25. Prueba de normalidad de aluminio pre y post tratamiento.

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Aluminio Pre | ,217 | 10 | ,200 | ,896 | 10 | ,198 |
| Aluminio Post | ,220 | 10 | ,185 | ,877 | 10 | ,121 |

La tabla 25 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de aluminio pre (0.198) y post (0.121) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de aluminio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de aluminio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 26. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de Aluminio

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|--|-------------------------|---------------------|----------------------|--|-------------|----------|----|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | |
| Par Aluminio 1 Pre Aluminio Post | 1961,715700 | 1,194910 | ,377864 | 1960,860913 | 1962,570487 | 5191,594 | 9 | ,000 |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de aluminio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de Cal

no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento”, lo que demuestra que el valor del parámetro de aluminio es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 1961,715700 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 1960,860913 y 1962,570487. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.2. Arsénico

La concentración de arsénico antes del tratamiento tuvo un valor de menos 0.010 mg/l; y a la salida del tratamiento se obtuvo el mismo valor de menos 0.010 mg/l; por lo tanto la remoción de este parámetro fue de 0% (tabla 18). Al agregar la lechada de cal no precipito el arsénico, debido que el valor antes de ingresar fue demasiado bajo (no considerable) para el tratamiento, el mismo valor se encontró en los ensayos de laboratorio pre y post tratamiento, según Lillo (2008) y Lottermoser (2007) argumentan que las mayores concentraciones de arsénico aparecen en sulfuros como piritita, calcopiritita, galena y marcasita, donde el arsénico se encuentra sustituyendo al azufre en la estructura. Taylor et al. (2005) advierte que el arsénico (III) no se ve afectado por el control del pH solo, a menudo se requiere pasos de tratamiento adicionales si este metal está presente en el drenaje ácido de mina.

La cantidad arsénico obtenido a la salida del sistema de tratamiento fue de 0.010mg/l, cumpliendo así el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 0.2mg/l (figura 25), y también cumple el valor establecido con Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes

líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento que considera un rango de 0.1 mg/l (figura 26)

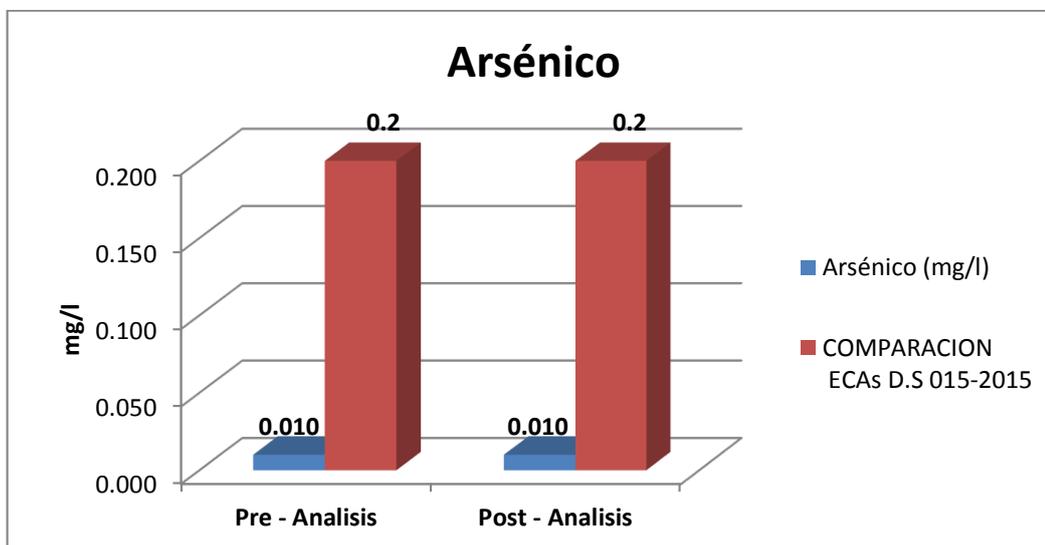


Figura 25. Comparación del parámetro arsénico antes y después del tratamiento con ECA de agua

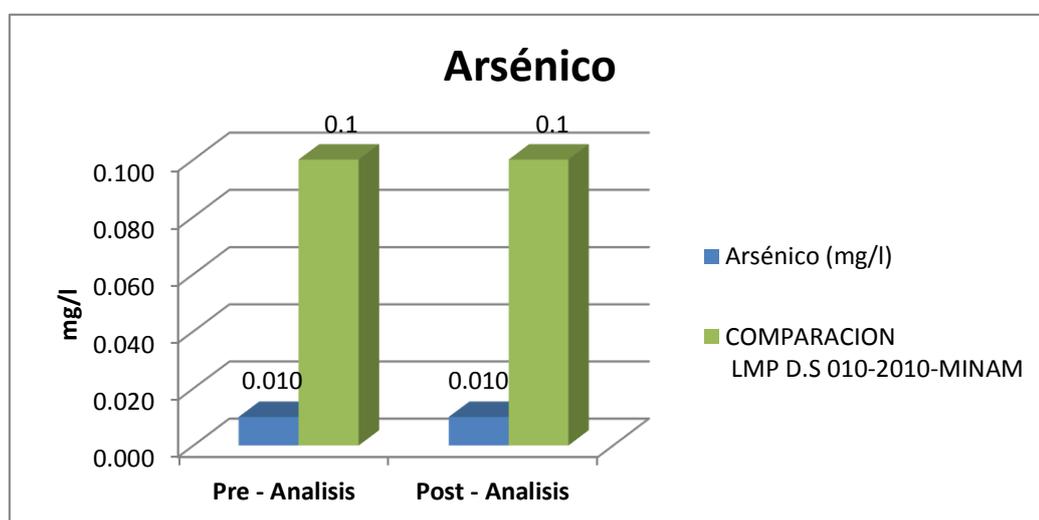


Figura 26. Comparación del parámetro arsénico antes y después del tratamiento con LMP's.

▪ **Prueba de Normalidad**

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 27. Prueba de normalidad de arsénico pre y post tratamiento.

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Arsénico Pre | ,179 | 10 | ,200 | ,932 | 10 | ,473 |
| Arsénico Post | ,119 | 10 | ,200 | ,951 | 10 | ,681 |

La tabla 27 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de arsénico pre (0.473) y post (0.681) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de arsénico obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de arsénico obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 28. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de arsénico.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|----------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|----------|--------|---|------|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | | |
| Par 1 Arsénico Pre Arsénico Post | -.003700 | .008757 | .002769 | -.009964 | .002564 | -1,336 | 9 | ,214 | |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.214 es mayor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que

el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de arsénico obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de Cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de arsénico es igual después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de -0.003700 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores -0.009964 y 0.002564. Como se observa, la diferencia no se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto no se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.3. Berilio

La concentración de berilio en el ingreso hacia el sistema de tratamiento con lechada de cal fue 0.305 mg/l; y a la salida se obtuvo un valor de 0.001 mg/l. Por lo tanto la remoción de este parámetro fue de 99.7% (tabla 18). La reducción de la concentración de berilio se debe al aumento de pH en la cual se encuentra la solución, es decir, a medida que el ph aumenta por adición de la lechada de cal, la solubilidad del hidróxido de berilio disminuye, por consiguiente se produce la precipitación (Jiménez, 2001).

El valor obtenido a la salida del sistema de tratamiento fue de 0.001mg/l, cumpliendo así el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 0.1 mg/l (figura 27).

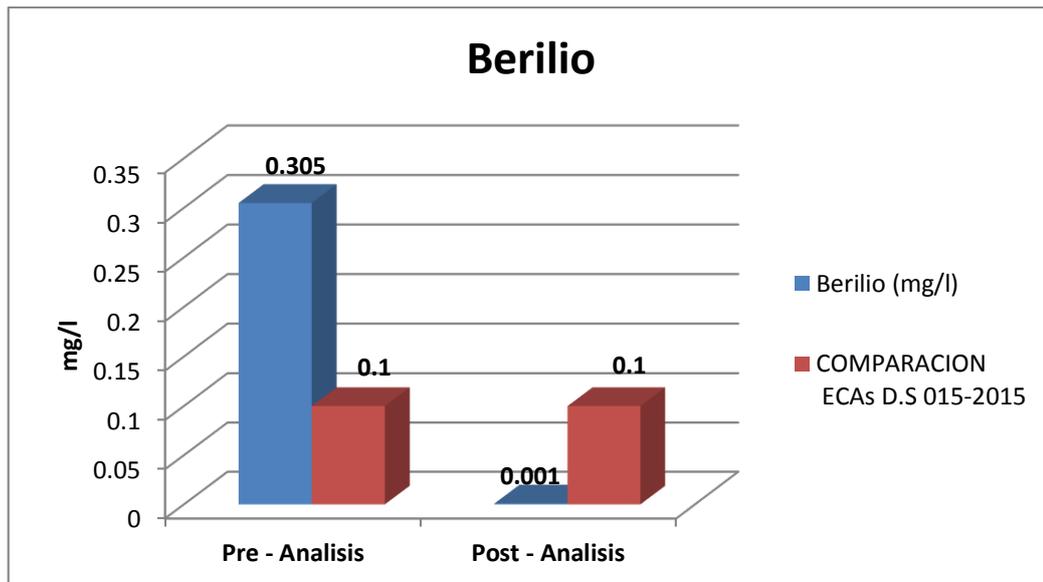


Figura 27. Comparación del parámetro berilio antes y después del tratamiento con norma.

▪ Prueba de Normalidad

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 29. Prueba de normalidad de berilio pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Berilio Pre | ,243 | 10 | ,097 | ,880 | 10 | ,132 |
| Berilio Post | ,135 | 10 | ,200 | ,956 | 10 | ,734 |

La tabla 29 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de berilio pre (0.132) y post (0.734) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de berilio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de berilio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 30. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de berilio.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|----------|--------|---|------|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | | |
| Par 1 Berilio Pre Berilio Post | .33463 | .043627 | .013796 | .303421 | .365839 | 24,256 | 9 | ,000 | |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de berilio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de Cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de berilio es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 0.33463 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 0.303421 y 0.365839 Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.4.Boro

Se muestra en la tabla 18 diferencia en los valores presentados en el parámetro de boro, siendo un valor de 5.515 mg/l en el ingreso hacia el sistema de tratamiento; y a la salida se obtuvo el mismo valor a 0.010 mg/l. Con el uso de la lechada de cal a un pH de 8.1 el porcentaje de remoción fue de 99.8%, lo cual se da por precipitación del metal, en ese mismo sentido el Organización

Panamericana de la salud (2005) menciona que en estudios realizados en plantas piloto han demostrado la gran eficiencia de remoción de boro en los procesos de ablandamiento con cal o soda a pH 8,5–11,3 (98%). Aparte de ello la carencia o el exceso de boro en al agua repercute de una forma importante en las plantas (nutrición y crecimiento) (De la fuente, 2000).

Además la cantidad de Boro obtenido a la salida del sistema de tratamiento cumple el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 5 mg/l (figura 28).

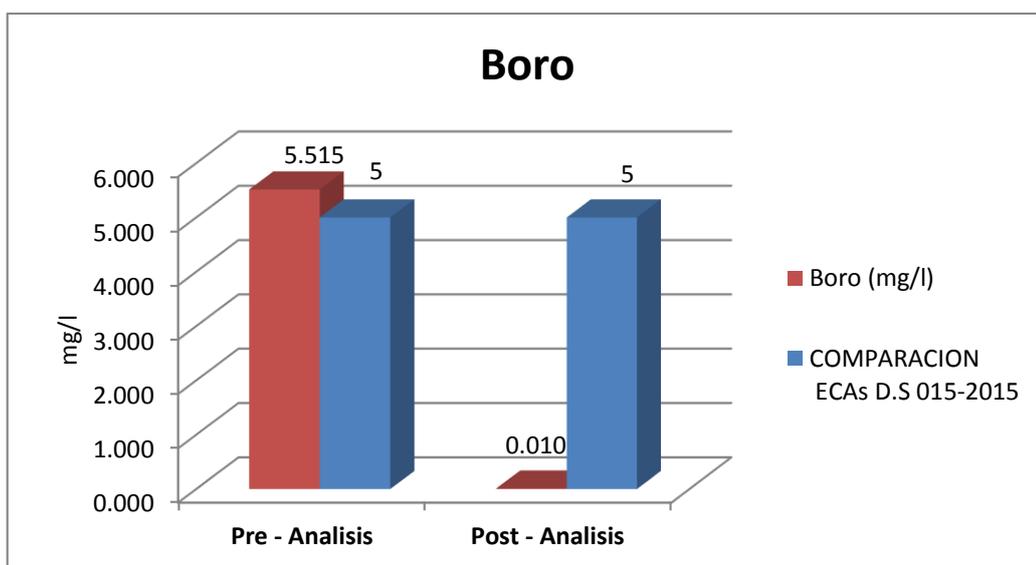


Figura 28. Comparación del parámetro boro antes y después del tratamiento con norma.

- **Prueba de Normalidad**

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 31. Prueba de normalidad de boro pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Boro Pre | ,162 | 10 | ,200 | ,967 | 10 | ,863 |
| Boro Post | ,163 | 10 | ,200 | ,947 | 10 | ,631 |

La tabla 31 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de boro pre (0.863) y post (0.631) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

- **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de boro obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de boro obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 32. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de boro

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|-----------|---------|----|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | |
| Par 1 Boro Pre Boro Post | 5,4861000 | .0255623 | .0080835 | 5.4678138 | 5.5043862 | 678,677 | 9 | ,000 |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de boro obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de Cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de boro es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 5.4861000 y que el límite

aceptable está comprendido entre los valores 5.4678138 y 5.5043862. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.5. Cadmio

Se muestra en la tabla 18 diferencia en los valores presentados en el parámetro de cadmio, siendo un valor de 0.279 mg/l en el ingreso hacia el sistema de tratamiento; y a la salida se obtuvo el mismo valor a 0.003 mg/l, por lo tanto la remoción de este parámetro fue de 98.9 % (tabla 18). La Organización Panamericana de la Salud (2005) manifiesta que una variable importante para la remoción es el pH, incluso para tener una efectividad cercana a 100%, se debe tener un pH alto. Cheremisinoff (1995) indica que la precipitación del hidróxido de Cadmio se da un pH que varía de 8, mientras Chavez et al. (2014) a un pH hasta 11. Entonces al agregar la lechada de cal, aumenta el ph a 8.1, donde se evidencia precipitación, debido a la disminución de la concentración después de aplicado el tratamiento.

La cantidad de Cadmio obtenido a la salida del sistema de tratamiento fue de 0.003 mg/l, cumpliendo así el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 0.05 mg/l (figura 29), y también cumple el valor establecido con Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento que considera un rango de 0.05 mg/l (figura 30).

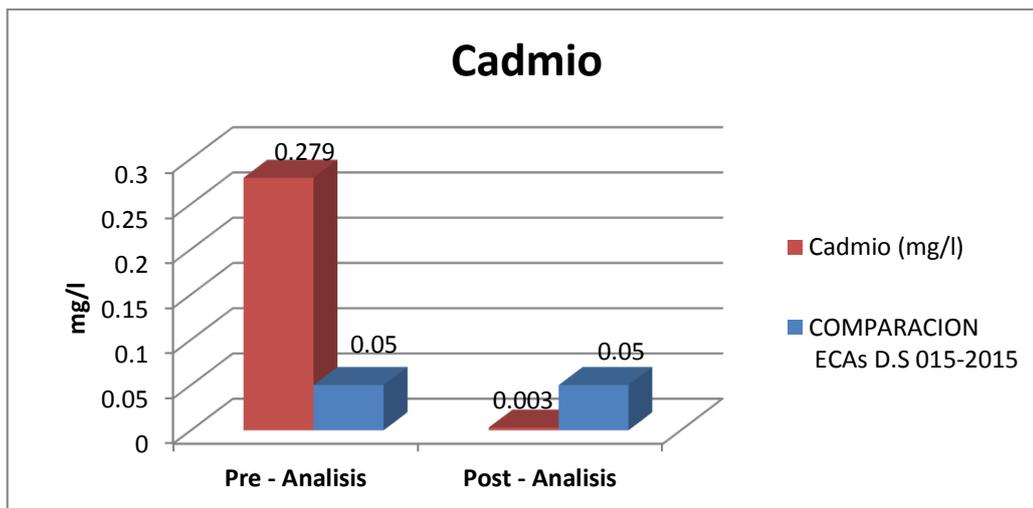


Figura 29. Comparación del parámetro cadmio antes y después del tratamiento con ECA de agua.

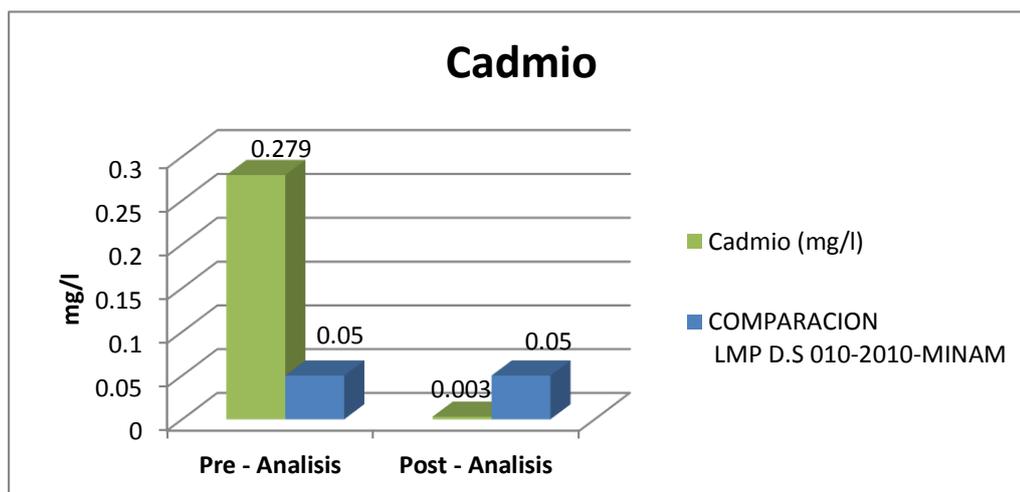


Figura 30. Comparación del parámetro cadmio antes y después del tratamiento con LMP's.

- **Prueba de Normalidad**

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento.

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 33. Prueba de normalidad de cadmio pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Cadmio Pre | ,170 | 10 | ,200 | ,951 | 10 | ,676 |
| Cadmio Post | ,214 | 10 | ,200 | ,855 | 10 | ,067 |

La tabla 34 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de cadmio pre (0.676) y post (0.067) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ Prueba de hipótesis T-Student

Hipótesis

H_0 : Los datos de cadmio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de cadmio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 34. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de cadmio.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|------------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|----------|--------|---|------|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | | |
| Par 1 Cadmio Pre Cadmio Post | .286100 | .022971 | .007264 | .269668 | .302532 | 39,386 | 9 | ,000 | |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis “Los datos de cadmio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de Cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento”, lo que demuestra que el valor del parámetro de cadmio es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 0.286100 y que el límite

aceptable está comprendido entre los valores 0.269668 y 0.302532. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.6.Cobalto

Se muestra en la tabla 18 diferencia en los valores presentados en el parámetro de cobalto, siendo un valor de 0.279 mg/l en el ingreso hacia el sistema de tratamiento; y a la salida se obtuvo el mismo valor a 0.003 mg/l, por lo tanto la remoción de este parámetro fue de 98.9% (tabla 18). La reducción de la concentración de ciertos metales siempre está asociado a un control de pH, sin embargo para el caso del cobalto es incierto (Taylor et al., 2005), pero se observa que aplicando el tratamiento con lechada de cal existe una reducción considerable de la concentración a un pH de 8.1. En la naturaleza el cobalto aparece siempre asociado al níquel y en muchos casos al arsénico (Odetti & Bottani, 2006), asimismo Chavez et al. (2014) menciona que las altas concentraciones pueden afectar adversamente el crecimiento de las plantas o del ganado si están presentes en las aguas usadas para irrigación.

La cantidad de cobalto obtenido a la salida del sistema de tratamiento fue de 0.003 mg/l, cumpliendo así el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 0.05 mg/l (figura 31).

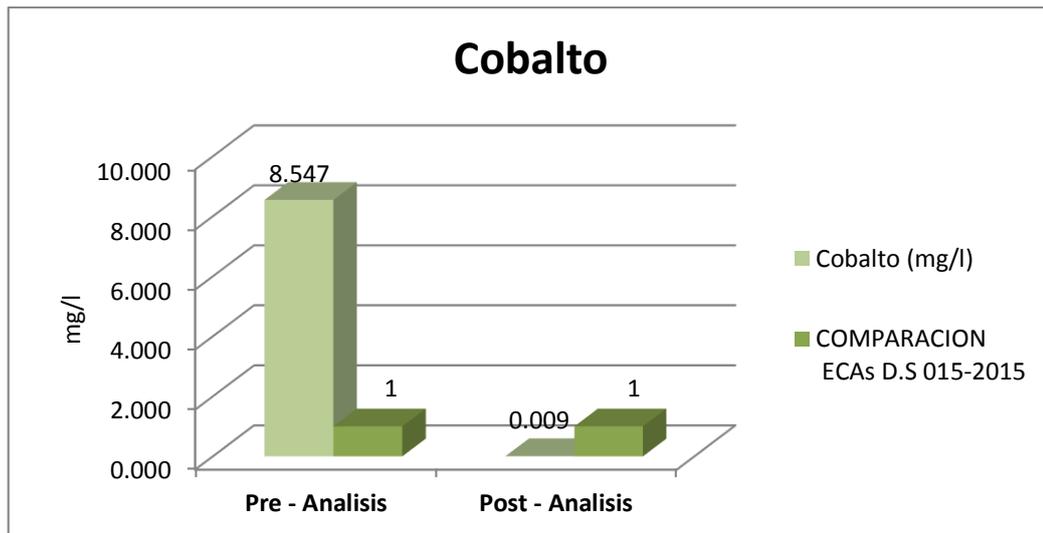


Figura 31. Comparación del parámetro cobalto antes y después del tratamiento con norma

▪ **Prueba de Normalidad**

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 35. Prueba de normalidad de cobalto pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Cobalto Pre | ,135 | 10 | ,200 | ,945 | 10 | ,608 |
| Cobalto Post | ,215 | 10 | ,200 | ,864 | 10 | ,086 |

La tabla 35 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de cobalto pre (0.608) y post (0.086) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de cobalto obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de cobalto obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 36. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de cobalto

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|--------------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|----------|---------|---|------|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | | |
| Par 1 Cobalto Pre Cobalto Post | 8.534200 | .031909 | .010090 | 8.511374 | 8.557026 | 845,768 | 9 | ,000 | |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de cobalto obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de cobalto es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 8.534200 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 8.511374 y 8.557026. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.7.Cobre

La concentración de cromo antes del ingreso hacia el sistema de tratamiento con lechada de cal fue de 33.87 mg/l; y a la salida se obtuvo el mismo valor a 0.018 mg/l. La remoción de este parámetro fue de 99.9% (tabla 18). La alta concentración de cobre presente en el drenaje ácido, se debe por la oxidación de sulfuro (calcopirita) que se realiza por la exposición a la condiciones atmosféricas

(Odetti & Bottani, 2006). Para la remoción de cobre, Lottermoser (2007) afirma que la neutralización con lechada de cal es eficiente para eliminar la concentración de cobre presente en el drenaje ácido de mina, así mismo J. Skousen et al. (1998) destaca que la remoción se da por precipitación en condiciones alcalinas, además Jiménez (2001) menciona que el porcentaje de remoción que se logra por precipitación es de 98%, aunque este porcentaje es efectivo en un rango de pH que va de 9 a 10.3 (Cheremisinoff, 1995). Sin embargo en los estudios realizados por Chavez et al. (2014) admite que el hidróxido de cobre precipita cuando el pH se incrementa a alrededor de 7, con la finalidad de lograr concentraciones por debajo de los niveles máximos permisibles.

La cantidad de Cobre obtenido a la salida del sistema de tratamiento fue de 0.003 mg/l, cumpliendo así el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 0.5 mg/l (Figura 32), y también cumple el valor establecido en los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento que considera un rango de 0.05 mg/l (figura 33)

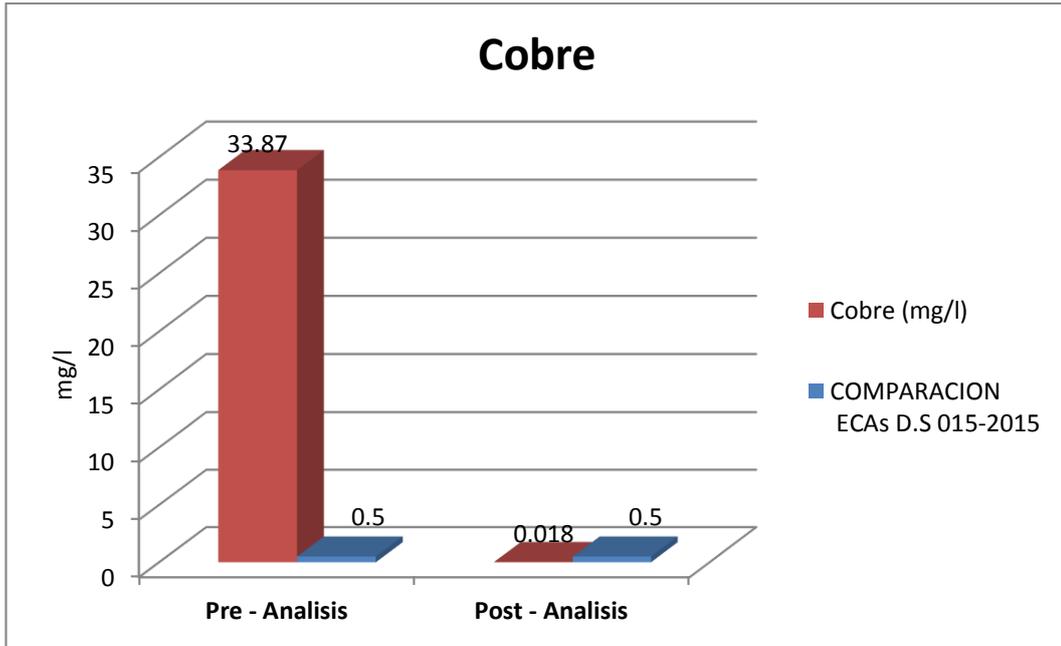


Figura 32. Comparación del parámetro cobre antes y después del tratamiento con ECA de agua.

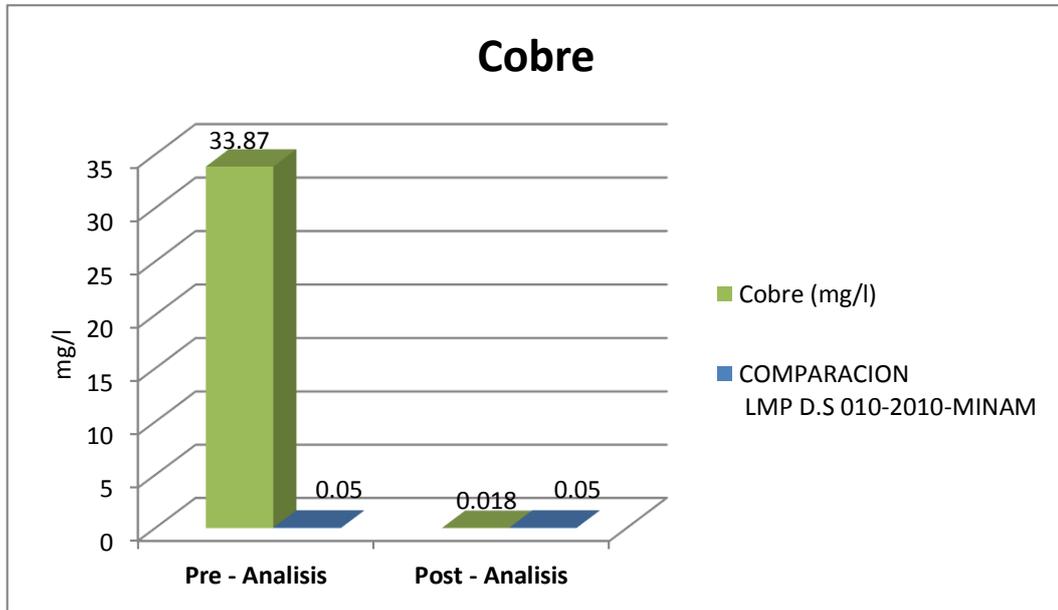


Figura 33. Comparación del parámetro cobre antes y después del tratamiento con LMP's.

▪ **Prueba de Normalidad**

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 37. Prueba de normalidad de cobre pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Cobre Pre | ,220 | 10 | ,184 | ,883 | 10 | ,141 |
| Cobre Post | ,189 | 10 | ,200 | ,932 | 10 | ,467 |

La tabla 37 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de cobre pre (0.141) y post (0.467) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de cobre obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de cobre obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025z$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 38. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de cobre

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|-----------|---------|---|------|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | | |
| Par 1 Cobre Pre Cobre Post | 33.798100 | 1.053536 | .333157 | 33.044446 | 34.551754 | 101,448 | 9 | ,000 | |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que

el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de cobre obtenidos después del tratamiento de aguas ácidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de cobre es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 33.798100 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 33.044446 y 34551754. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.8. Cromo

La concentración de cromo del agua ácida a tratar fue de 1.975 mg/l, luego de aplicar el tratamiento con lechada de cal se redujo a 0.009 mg/l, el porcentaje de remoción fue de 99.5% (tabla 18). En un medio ácido, el cromo se encuentra de forma hexavalente, para que se realice la precipitación se requiere de un pre-tratamiento con el fin de reducir el cromo hexavalente a su forma trivalente y así poder incrementar el pH (Odetti & Bottani, 2006). Kaifer (2006) indica que la reducción de cromo (IV) a Cromo (III) se da por la presencia de sulfato ferroso que está presente en el agua ácida. Cheremisinoff (1995) añade que utilizando cal el hidróxido de cromo precipita a un pH de 7.5 y la concentración del efluentes es de 0.2 ppm. Sin embargo se determinó que el tratamiento de drenaje ácido con lechada de cal a un pH de 8.1, ha tenido como resultado una concentración de 0.009 mg/l mucho menor por lo sugerido con el uso de cal.

Por otro lado, el resultado post tratamiento de cromo cumple con el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad

Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales siendo un valor de 1 mg/l. (figura 34)

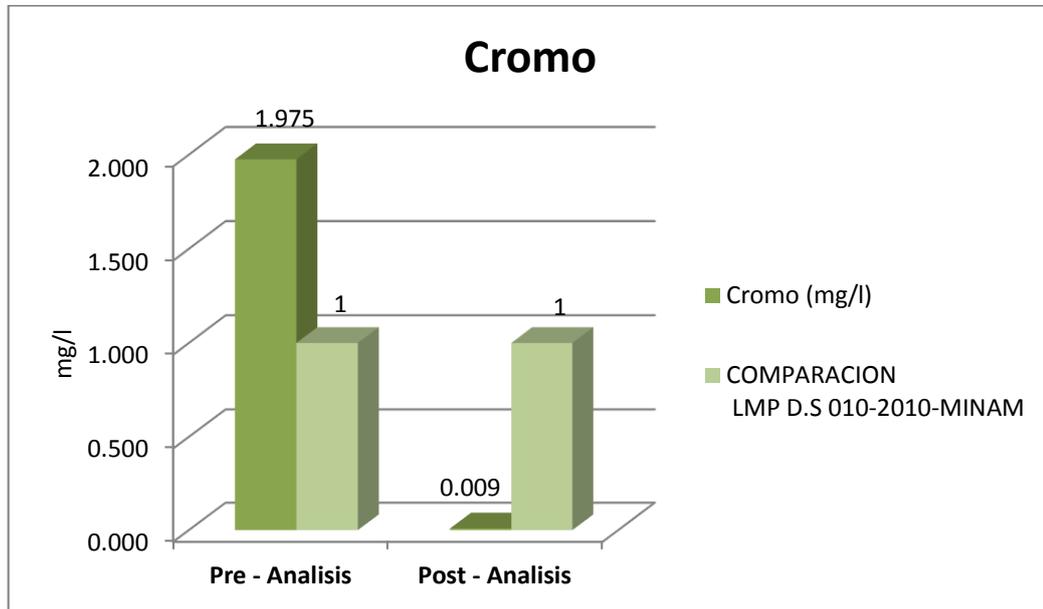


Figura 34. Comparación del parámetro cromo antes y después del tratamiento con ECA de agua.

▪ Prueba de Normalidad

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 39. Prueba de normalidad de cromo pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Cromo Pre | ,171 | 10 | ,200 | ,954 | 10 | ,722 |
| Cromo Post | ,229 | 10 | ,148 | ,859 | 10 | ,074 |

La tabla 39 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de cromo pre (0.722) y post (0.074) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de cromo obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de cromo obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025z$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 40. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de cromo.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|----------|---------|---|------|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | | |
| Par 1 Cromo Pre Cromo Post | 1.971300 | .029788 | .009420 | 1.949991 | 1.992609 | 209,270 | 9 | ,000 | |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de cromo obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de cromo es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 1.971300 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 1.949991 y 1.992609. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.9. Hierro

La concentración de hierro en el ingreso hacia el sistema de tratamiento fue de 5216 mg/l; y a la salida se obtuvo el mismo valor a 0.893 mg/l, el porcentaje de remoción fue de 99.98% (tabla 18). En los drenajes ácidos se presencia hierro ferroso a altas concentraciones por las reacciones químicas que se dan en la oxidación de la pirita, provocando una disminución del pH (López et al., 2002).

Chavez et al. (2014) indica que el tratamiento más utilizado para reducir la concentración de hierro es el que emplea cal, en cuya etapa inicial se produce la neutralización de la acidez y finaliza con la oxidación del hierro ferroso para formar hidróxido férrico que es insoluble y precipita, además Aduvire (2006) menciona que la precipitación del hidróxido es en un pH superior de 7, en ese mismo sentido la Organización Panamericana de la Salud (2005) agrega que los tratamientos convencionales pueden eliminar el hierro en estado férrico pero no el hierro soluble Fe (II). Por otro lado, se observa que se tiene una reducción considerable después de aplicar el tratamiento a un pH de 8.1.

La cantidad de Hierro obtenido a la salida del sistema de tratamiento fue de 0.009 mg/l, no se tiene valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales (figura 35)

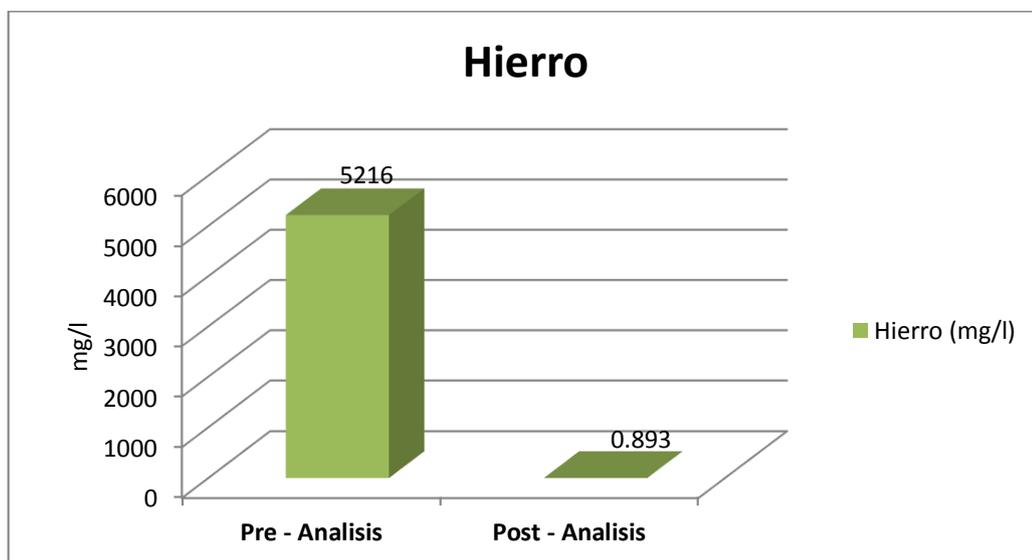


Figura 35. Comparación del parámetro hierro antes y después del tratamiento con norma.

▪ **Prueba de Normalidad**

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 41. Prueba de normalidad de Hierro pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Hierro Pre | ,240 | 10 | ,109 | ,869 | 10 | ,099 |
| Hierro Post | ,165 | 10 | ,200 | ,907 | 10 | ,259 |

La tabla 41 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de hierro pre (0.099) y post (0.259) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de hierro obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de hierro obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 42. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de hierro.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Media | Diferencias emparejadas | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---------------------------------|-------------|-------------------------|----------------------|--|-------------|-----------|----|------------------|
| | | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | |
| Par 1 Hierro Pre Hierro Post | 5215,304000 | 1,814156 | ,573687 | 5214,006231 | 5216,601769 | 9,090,858 | 9 | ,000 |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de hierro

obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de Cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento”, lo que demuestra que el valor del parámetro de hierro es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 5215,304000y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 5214,006231 y 5216,601769. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.10. Magnesio

Se muestra en la tabla 18 diferencia en los valores presentados en el parámetro de magnesio, siendo un valor de 665.6 mg/l en el ingreso hacia el sistema de tratamiento; y a la salida se obtuvo un valor de 109.5 mg/l, se obtuvo un porcentaje de remoción de 83.5% (tabla 18). Según Manahan (2007) el magnesio está presente en el agua como bicarbonatos o sulfato, las altas concentraciones provoca la dureza del agua, sin embargo para la precipitación del magnesio como hidróxido requiere un pH superior que la precipitación del calcio como carbonato. Por otro lado afirmamos que la concentración de hidróxido de magnesio ha disminuido a un pH de 8.1 con el tratamiento de drenajes acido de mina con lechada de cal.

La cantidad de Magnesio obtenido a la salida del sistema de tratamiento fue de 109.5 mg/l, cumpliendo así el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 250 mg/l (figura 36).

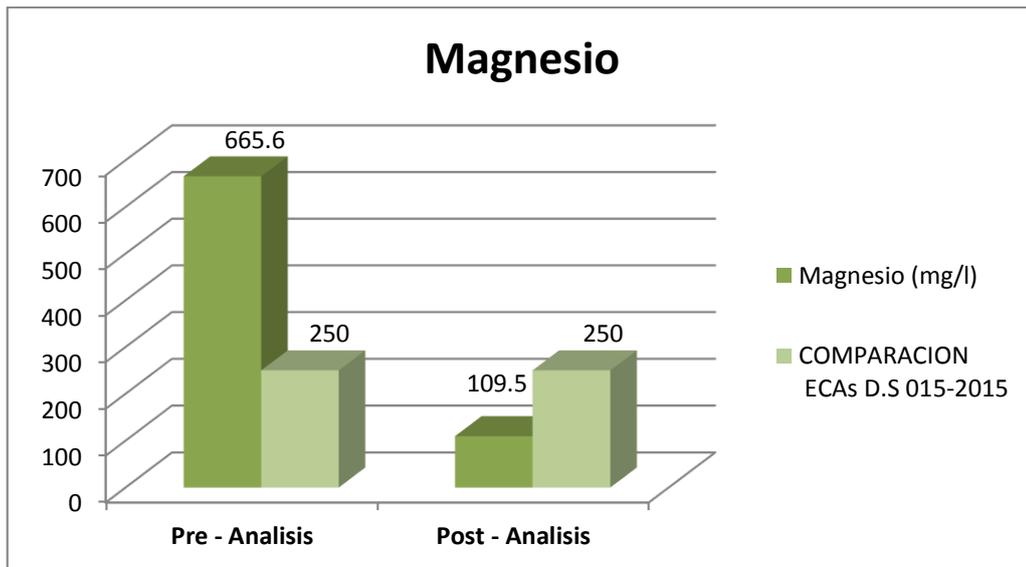


Figura 36. Comparación del parámetro magnesio antes y después del tratamiento con norma.

▪ Prueba de Normalidad

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 43. Prueba de normalidad de magnesio pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Magnesio Pre | ,176 | 10 | ,200 | ,922 | 10 | ,376 |
| Magnesio Post | ,206 | 10 | ,200 | ,897 | 10 | ,202 |

La tabla 43 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de magnesio pre (0.376) y post (0.202) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de magnesio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de magnesio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025z$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 44. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de magnesio

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|--|-------------------------|---------------------|----------------------|--|----------|---------|----|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | |
| Par 1 Magnesio Pre Magnesio Post | 556.6000 | 1.8445 | .5833 | 555.2805 | 557.9195 | 954,249 | 9 | ,000 |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de magnesio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de magnesio es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 556.6000 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 555.2805 y 557.9195. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.11. Manganeso

La concentración de manganeso del agua ácida a tratar 115.9 mg/l luego del tratamiento fue de 1.484 mg/l, el porcentaje de remoción fue de 98.7% (tabla 18). La presencia de manganeso no es común en el agua, y cuando se presenta está asociado al hierro. Comúnmente se encuentra en el agua bajo su estado reducido, Mn (II), y su exposición al aire y al oxígeno disuelto lo transforma en óxidos

hidratados menos solubles (Organización Panamericana de la Salud, 2005). El ion manganeso es bivalente y trivalente positivo, también se presenta con valencia +4 formando el MnO_2 que es insoluble. El oxígeno de la atmósfera reacciona con las formas solubles del manganeso (Mn^{+2}) del agua cruda para producir óxidos relativamente insolubles (Mn^{+4}) de estos elementos. La velocidad de reacción depende del pH de la solución, siendo más rápida a valores de pH altos. (Valencia, 2011). La precipitación de manganeso es variable debido a sus muchos estados de oxidación, pero generalmente precipitará a un pH de 9,0 a 9,5. A veces, un pH de 10.5 es necesario para la eliminación completa de manganeso (Chavez et al., 2014), además J. G. Skousen (2002) menciona que la precipitación de hierro elimina en gran parte el manganeso del agua a pH <8 debido a co-precipitación, pero sólo si la concentración de hierro en el agua es mucho mayor que el contenido de manganeso (aproximadamente 4 veces más o mayor). Esta co-precipitación sucede en los resultados obtenidos en los ensayos post-tratamiento a nivel de laboratorio y de campo, ya que el manganeso no se reduce hasta cumplir con el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 0.2 mg/l (figura 37), por lo tanto se debe considerar un segundo tratamiento para la eliminación completa del manganeso.

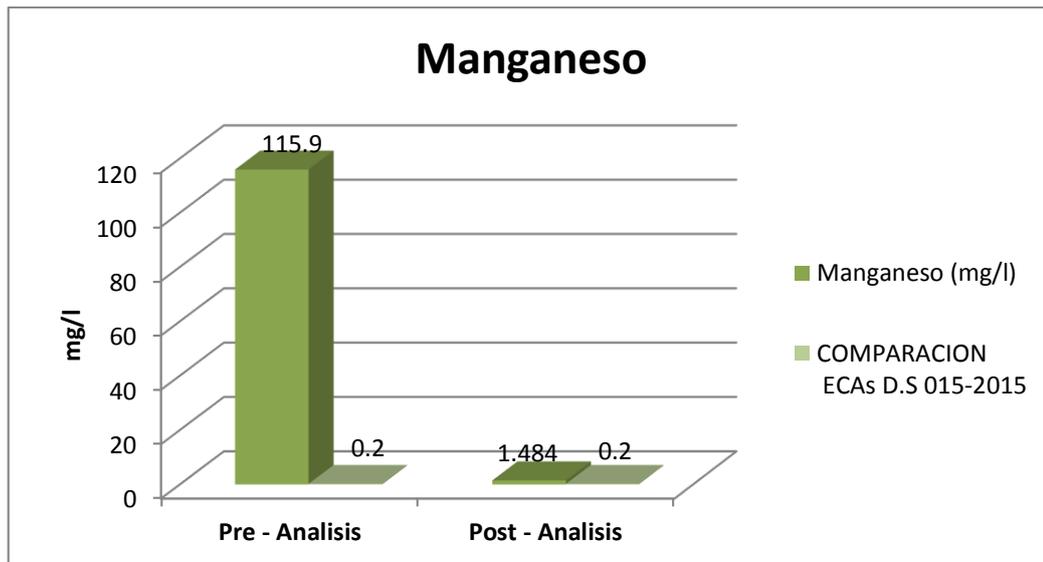


Figura 37. Comparación del parámetro manganeso antes y después del tratamiento con norma.

▪ Prueba de Normalidad

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 45. Prueba de normalidad de manganeso pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Manganeso Pre | ,207 | 10 | ,200 | ,930 | 10 | ,448 |
| Manganeso Post | ,219 | 10 | ,191 | ,921 | 10 | ,368 |

La tabla 45 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de manganeso pre (0.448) y post (0.368) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de manganeso obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de manganeso obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025z$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 46. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de manganeso.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|--------------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|------------|---------|---|------|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | | |
| Par 1 Manganeseo Pre Manganeseo Post | 4.456100 | 1.140755 | .360738 | 113.640053 | 115.272147 | 317,283 | 9 | ,000 | |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de manganeso obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de manganeso es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 4.456100 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 113.640053 y 115.272147. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.12. Níquel

Se muestra en la tabla 18 diferencia en los valores presentados en el parámetro de níquel, siendo un valor de 12.39 mg/l en el ingreso hacia el sistema de tratamiento; y a la salida se obtuvo el mismo valor a 0.012 mg/l, se obtuvo un porcentaje de remoción de 99.9% (tabla 18). La alta concentración de níquel, se debe a que en soluciones ácidas se disuelve con facilidad, además para la eliminación como

hidróxido se agrega derivados de la cal (Odetti & Bottani, 2006). Cheremisinoff (1995) indica que el níquel se puede eliminar por precipitación a un pH que varía de 11. Sin embargo a un pH de 8.1 se verifica que existe una reducción de la concentración de níquel después de aplicar el tratamiento con lechada de cal. Por otro lado el resultado obtenido post tratamiento cumple con el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 1 mg/l (figura 38), y también cumple con el valor establecido en los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento que considera un rango de 0.2 mg/l (figura 39)

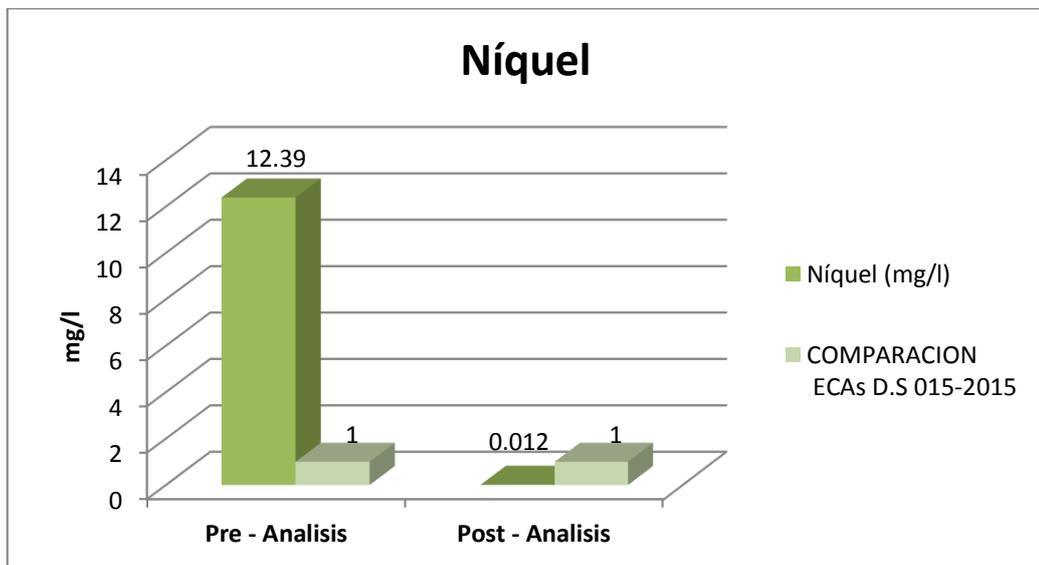


Figura 38. Comparación del parámetro níquel antes y después del tratamiento con ECA de Agua.

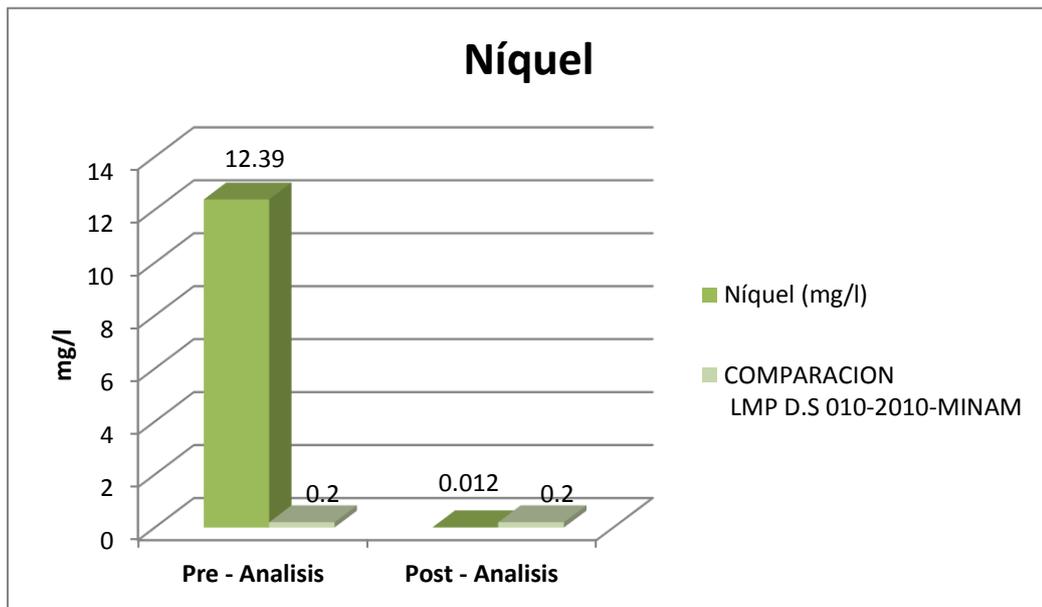


Figura 39. Comparación del parámetro níquel antes y después del tratamiento con LMP's.

▪ Prueba de Normalidad

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 47. Prueba de normalidad de níquel pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Níquel Pre | ,145 | 10 | ,200 | ,952 | 10 | ,691 |
| Níquel Post | ,213 | 10 | ,200 | ,911 | 10 | ,287 |

La tabla 47 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de níquel pre (0.691) y post (0.287) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

- **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de níquel obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de níquel obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025z$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 48. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de níquel

| Prueba de Muestras Relacionadas | Media | Desviación estándar | Media error estándar | Diferencias emparejadas | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---------------------------------|-----------|---------------------|----------------------|--|-----------|--------|----|------------------|
| | | | | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | |
| Par 1 Níquel Pre Níquel Post | 12.405000 | .510294 | .161369 | 12.039958 | 12.770042 | 76,873 | 9 | ,000 |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de níquel obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de níquel es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 12.405000 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 12.039958 y 12.770042. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.13. Plomo

Se muestra en la tabla 18 la diferencia en los valores presentados en el parámetro de plomo, siendo un valor de 0.008 mg/l en el ingreso hacia el sistema de tratamiento; y a la salida se obtuvo el mismo valor a 0.008 mg/l, el porcentaje de remoción fue de 0% (tabla 18). Cheremisinoff (1995) indica que el plomo puede eliminarse por precipitación como hidróxido (cal) a pH 11,5 y la concentración de

efluente es de 0,02 a 0,2 ppm. Sin embargo se puede indicar que al tratar con lechada de cal y aumentar a un pH de 8.1, no existe precipitación del metal presente en la muestra ácida.

Por otro lado la cantidad de plomo presente en la muestra de agua ácida, cumple con el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 0.05 mg/l (figura 40) y también cumple con el valor establecido en los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento que considera un rango de 0.2 mg/l (figura 41)

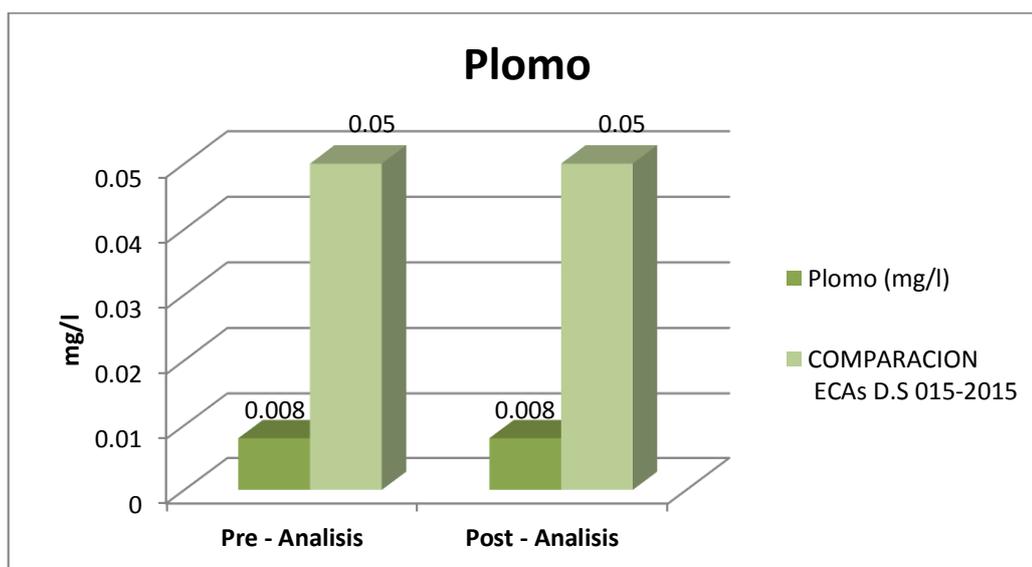


Figura 40. Comparación del parámetro plomo antes y después del tratamiento con ECA de agua.

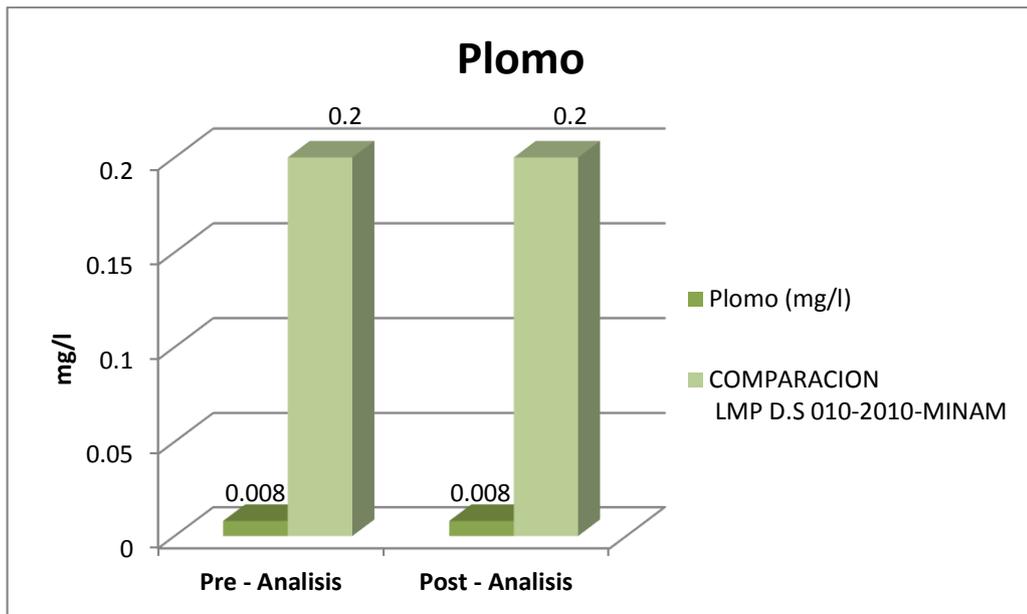


Figura 41. Comparación del parámetro plomo antes y después del tratamiento con LMP's.

▪ Prueba de Normalidad

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 49. Prueba de normalidad de plomo pre y post tratamiento.

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Plomo Pre | ,179 | 10 | ,200 | ,929 | 10 | ,439 |
| Plomo Post | ,190 | 10 | ,200 | ,857 | 10 | ,071 |

La tabla 49 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de plomo pre (0.439) y post (0.071) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ **Prueba de hipótesis T-Student**

Hipótesis

H_0 : Los datos de plomo obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de plomo obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 50. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de plomo.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|----------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|----------|------|---|------|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | | |
| Par 1 Plomo Pre Plomo Post | .000300 | .004001 | .001265 | -.002562 | .003162 | ,237 | 9 | ,000 | |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de plomo obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de plomo es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 0.000300 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores -0.002562 y 0.003162. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.14. Selenio

Se muestra en la tabla 18 diferencia en los valores presentados en el parámetro de selenio, siendo un valor de 0.010 mg/l en el ingreso hacia el sistema de tratamiento; y a la salida se obtuvo el mismo valor a 0.010 mg/l, por lo tanto el porcentaje de remoción fue de 0% . El selenio se encuentra muy distribuido en la corteza terrestre hallándose en rocas y suelos en concentraciones desde 0.1 a 2

ppm, siendo el carbón una de las fuentes más importantes de selenio donde lo podemos encontrar en concentraciones de 0.5 a 12 ppm, así mismo siempre está combinado con los metales, especialmente con el plomo, cobre, plata y mercurio (Manahan, 2007). El selenio puede recuperarse de soluciones residuales por reacción con dióxido de azufre para precipitar el selenio elemental (Kaifer, 2006). Se puede indicar que al tratar el selenio con lechada de cal no existe precipitación, debido que requiere de otro tratamiento. Sin embargo la cantidad de selenio obtenido a la salida del sistema de tratamiento fue de 0.010 mg/l, cumpliendo así el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 0.05 mg/l (figura 42).

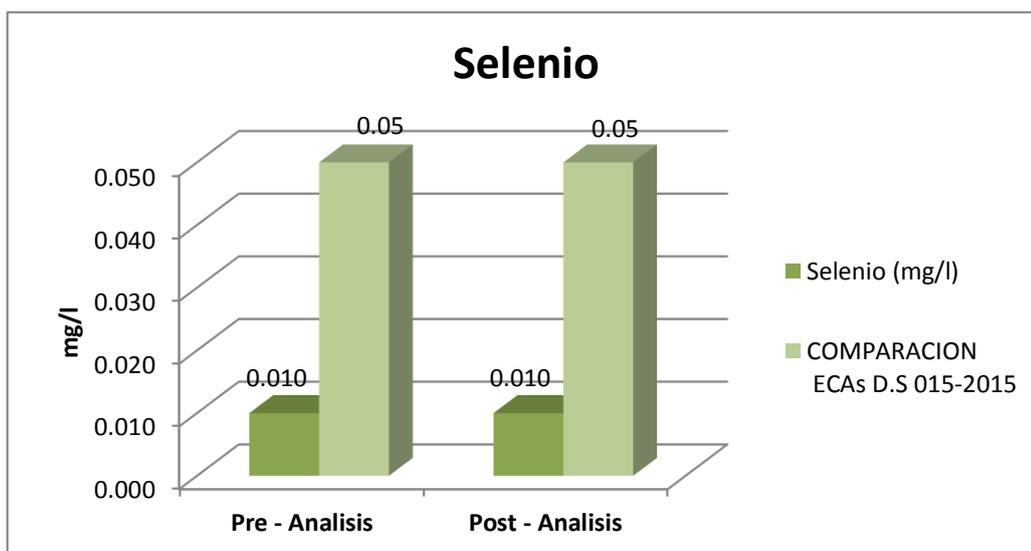


Figura 42. Comparación del parámetro selenio antes y después del tratamiento con norma.

▪ Prueba de Normalidad

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 51. Prueba de normalidad de selenio pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Selenio Pre | ,224 | 10 | ,168 | ,869 | 10 | ,097 |
| Selenio Post | ,208 | 10 | ,200 | ,924 | 10 | ,391 |

La tabla 51 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de selenio pre (0.097) y post (0.391) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ Prueba de hipótesis T-Student

Hipótesis

H_0 : Los datos de selenio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de selenio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025z$

$P > 0.25$ se aprueba la H_0

$P < 0.25$ se aprueba la H_1

Tabla 52. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de selenio.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--|----------|------|----|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | |
| Par 1 Selenio Pre Selenio Post | .000100 | .003510 | .001110 | -.002411 | .002611 | ,090 | 9 | ,000 |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de selenio obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de selenio es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 0.000100 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores -0.002411 y 0.002611. Como se

observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

4.3.2.15. Zinc

La cantidad de zinc antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante neutralización activo con lechada de cal fue de 46.97 mg/l, y a la salida se obtuvo un valor de 0.022 mg/l; por lo tanto la remoción de este metal fue de 99.95% (tabla 18). Jiménez (2001) indica que utilizando lechada de cal se puede remover el zinc del agua residual mediante precipitación química con eficiencia mayor del 90%. El pH óptimo para la precipitación del hidróxido de zinc es de 9.5, sin embargo precipitará a valores de pH debajo del pH óptimo basado en la solubilidad del hidróxido, debido a la combinación de la precipitación y co-precipitación de carbonato con otros metales (Chavez et al., 2014).

Por otro lado al aumentar el pH a 8.1 con el uso de la lechada de cal, se observa una disminución considerable del metal. Así mismo la cantidad de Zinc obtenido a la salida del sistema de tratamiento fue de 0.022 mg/l, cumpliendo así el valor establecido en el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para para Agua. Categoría 3 - Bebida de animales que considera un valor de 24 mg/l (figura 42), también cumple con el valor establecido en los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento que considera un rango de 1.5 mg/l (figura 43)

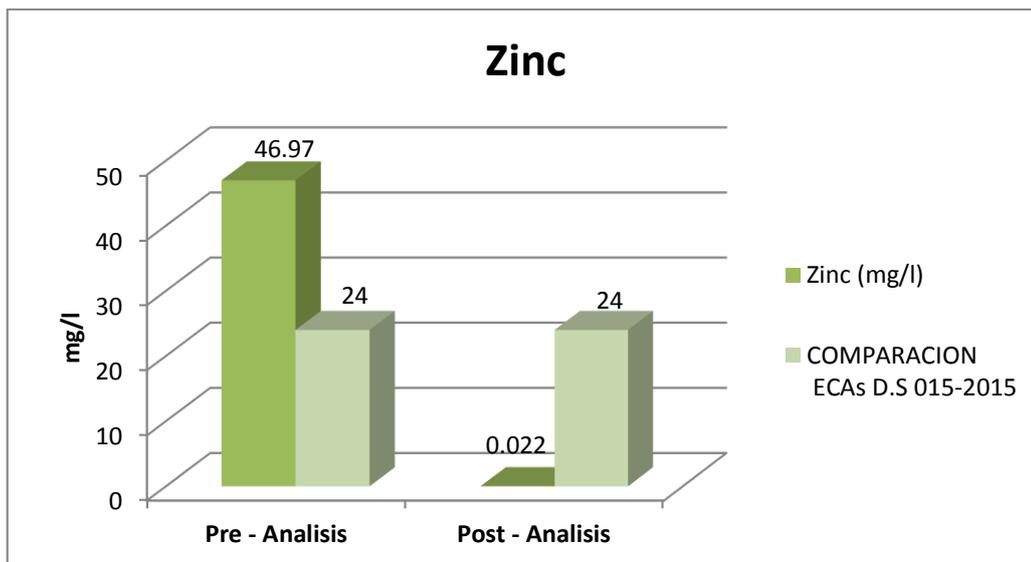


Figura 43. Comparación del parámetro zinc antes y después del tratamiento con ECA de agua

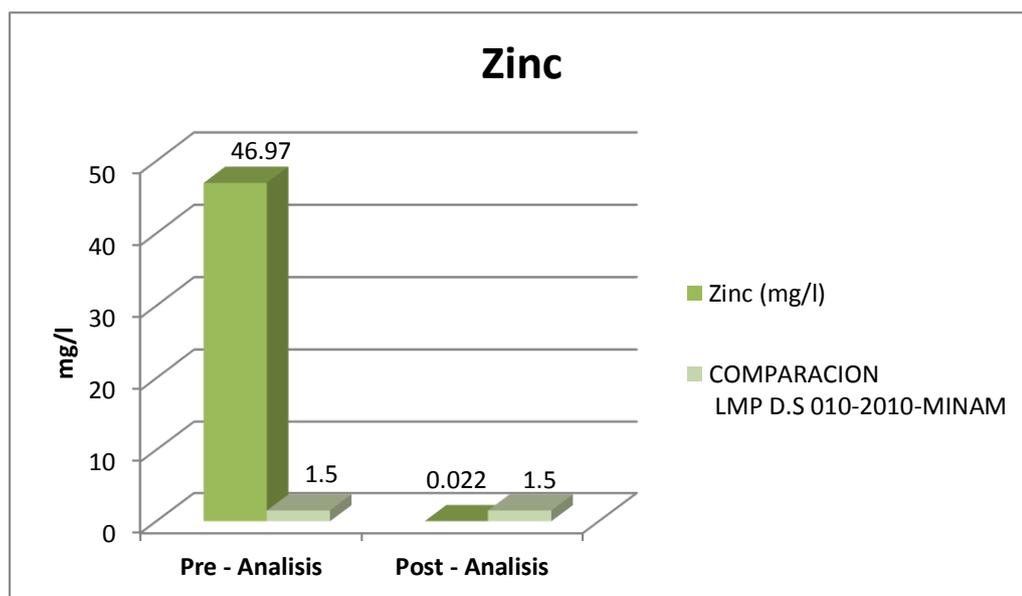


Figura 44. Comparación del parámetro zinc antes y después del tratamiento con LMP's.

▪ **Prueba de Normalidad**

Se realiza la prueba de normalidad tomando los datos obtenidos en pre tratamiento y post tratamiento

Las hipótesis son:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Los supuestos de esta prueba son:

Si la significancia de (P)

$P > 0.05$ se aprueba la H_0

$P < 0.05$ se aprueba la H_1

Tabla 53. Prueba de normalidad de zinc pre y post tratamiento

| Prueba de Normalidad | Kolmogorov-Smimov | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------|-------------------|----|------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Zinc Pre | ,236 | 10 | ,122 | ,899 | 10 | ,216 |
| Zinc Post | ,219 | 10 | ,191 | ,927 | 10 | ,422 |

La tabla 53 muestra el reporte de Shapiro-Wilk, siendo una muestra pequeña, para el parámetro de zinc pre (0.216) y post (0.422) tratamiento es mayor a 0.05; por lo que se deduce que los datos analizados siguen una distribución normal, aprobándose la hipótesis H_0 , supuesto clave para el uso de la Prueba T.

▪ Prueba de hipótesis T-Student

Hipótesis

H_0 : Los datos de zinc obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

H_1 : Los datos de zinc obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de cal no es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento.

Supuestos:

El contraste es bilateral, por lo tanto $0,05 / 2 = 0,025z$

$P > 0.025$ se aprueba la H_0

$P < 0.025$ se aprueba la H_1

Tabla 54. Prueba de muestras relacionadas del parámetro de zinc.

| Prueba de Muestras Relacionadas | Diferencias emparejadas | | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---|-------------------------|---------------------|----------------------|--|-----------|---------|---|------|------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | | |
| | | | | inferior | superior | | | | |
| Par 1 Zinc Pre Zinc Post | 47.167500 | .997794 | .315530 | 46.453721 | 47.881279 | 149,486 | 9 | ,000 | |

La prueba t de diferencia de las medias (promedios) obtenida antes y después de la aplicación del sistema de tratamiento de aguas acidas con lechada de cal tiene un nivel de significancia de 0.000 es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral); esto nos permite aceptar la hipótesis "Los datos de zinc obtenidos después del tratamiento de aguas acidas con lechada de Cal es significativamente mayor que los datos obtenidos antes del tratamiento", lo que demuestra que el valor del parámetro de zinc es menor después de aplicado el tratamiento. Además la diferencia entre las medias es de 47.167500 y que el límite

aceptable está comprendido entre los valores 46.453721 y -47.881279. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El sistema de tratamiento de aguas acidas mediante Lechada de Cal demostró una eficiencia de remoción de 78.65% en los parámetros inorgánicos (metales totales), mientras que en los parámetros físico –químicos, se obtuvo un valor de pH de 8.1, oxígeno disuelto de 5.54 mg/l y conductividad de 3.14 mS/cm, esto nos da entender que dichas aguas son aptas para la bebida de animales. Los datos de los parámetros físicos-químicos e inorgánicos fueron comparados con el D.S. N° 015-2015-MINAM Estándares de Calidad de Agua , Categoría 3 – Bebida de Animales y con los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM, Limite en cualquier momento, en donde se obtuvo que los datos estuvieron por debajo del valor de las normas, demostrando la eficiencia esperada; a excepción del manganeso que sobrepaso por 1.284 del valor establecido por el ECA de agua, que es de 0.2 mg/l.

Se diagnosticó que con el uso del sistema de tratamiento mediante neutralización activo con lechada de cal en los ensayos de laboratorio, se obtuvo altos porcentajes de eficiencia de remoción de los parámetros físico químicos e inorgánicos, demostrando que mediante este método se obtiene agua tratada de buena calidad de acuerdo a las normativas vigentes.

Se analizó los datos del agua antes de ser sometido al sistema de tratamiento mediante neutralización activo con lechada de cal, frente a los datos

después del tratamiento estadísticamente, ambas informaciones demostró que existieron diferencias significativas a nivel de campo del afluente con respecto al efluente.

5.2. Recomendaciones

De los datos obtenidos en la presente investigación, se recomienda tener en cuenta lo siguiente:

1. Profundizar la investigación en temas de tratamiento de agua ácida, para el parámetro de manganeso con el fin de disminuir este parámetro hasta un 99%.
2. Mejorar el sistema de tratamiento de aguas acidas mediante Lechada de Cal, para la optimización de la disminución de los parámetros físico-químicos e inorgánicos.
3. Desarrollar un plan de monitoreo y control del sistema de tratamiento con lechada de cal, a fin de cumplir con la normativa aplicable y de verificar la eficiencia del tratamiento.

BIBLIOGRAFIA

- Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina Generación y Tratamiento (pp. 1–140).
- Antonson, D., Haub, J., & Lapakko, K. (1998). Effects of Dissolution Time and Particle Size on Kinetic Test Results, 1–16.
- Avila, H. (2006). *Introducción a la metodología de la investigación*. (Eumed, Ed.) (1 nd). México. Retrieved from <http://www.eumed.net/libros-gratis/2006c/203/>
- Ayala, F., & Vadillo, L. (2004). *Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería* (2nd ed.). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Balintova, M., & Petrilakova, A. (2011). Study of pH influence on selective precipitation of heavy metals from acid mine drainage. *Chem Eng Trans*, 25, 345–350. Retrieved from <http://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/pres2011-and-icheap10/PRES11/217Balintova.pdf>
- Balvín, D., & Amezaga, J. (2006). "Estado de la Situación sobre la Gestión del agua en la Minería: El caso Peruano" (Vol. 2). Lima, Perú. Retrieved from <http://www.labor.org.pe/webermisa/images/ERMISA D1.pdf>
- Baquero, J. C., Fernández, R., Serrano, J., & Lorca, D. (2008). Tratamiento de Aguas Acidas. Prevención y Reducción de la Contaminación, 10, 44–47. Retrieved from http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_44.pdf
- Bianchini, F. (2006). *Calidad de agua del Río Tzalá (municipio de Sipakapa ; departamento de San Marcos)*. Guatemala. Retrieved from http://blog.reportero.org/wp-content/estudio_de_agua_del_rio_tzal.pdf
- Broughton, L. (1995). Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas, 6, 1–50.
- Broughton, L., & Robertson, A. (1992). Acid Rock Drainage from Mines- Where We are

Now, 1–19.

Campbell, D., & Stanley, J. (1966). *Disenos experimentales y cuasiexperimentales en la investigación social* (1ed ed.). Buenos Aires: Rand Mc Nally & Company.

Chaparro, L. (2015). Drenajes Ácidos de Mina Formación y Manejo, *1*, 53–57.

Chaparro, L. (2015). Drenajes Ácidos de Mina Formación y Manejo, *1*, 53–57.

Chavez, S., Luna, E., & Oscar, M. (2014). Proceso de tratamiento de neutralización y adsorción de efluentes minero-metalurgicos y aguas de mina con dolomita sin tratar y tratada. Lima, Perú. Retrieved from <https://www.google.com/patents/WO2014031014A2?cl=es>

Cheremisinoff, P. (1995). *Handbook of water and wastewater treatment technology*. United States of America: Marcel Dekker, INC. Retrieved from https://books.google.com.pe/books?id=B_d40rH_1GoC&pg=PA421&lpg=PA421&dq=precipitation+of+heavy+metals+from+wastewater+USING+HYDRATED+LIME&source=bl&ots=nfzqO6di2F&sig=3iadXby5yfAvKFliUzbDO2K8b9s&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwix5fKLoL7TAhVB6CYKHavtDPQQ6AEIVjAG

Costello, C. (2003). Acid Mine Drainage : Innovative Treatment Technologies, 1–47.

De la fuente, M. (2000). *Diseño y desarrollo de un sistema de tratamiento para la eliminación de boro en vertidos industriales*. Universidad Autónoma de Madrid. Retrieved from <http://oa.upm.es/155/1/05200006.pdf>

Del Águila, N. (2015). *Gestión de efluentes, tratamiento de agua ácidas y precipitación de aluminio y manganeso en la planta de tratamiento de la empresa minera Yanacocha*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* (1nd ed.). Cochabamba, Bolivia: Programa ALFA de la Unión Europea. Retrieved from <https://books.google.com.pe/books?id=1kO2J5aDljQC&pg=PA82&dq=oxigeno+dissuelto+en+aguas+residuales&hl=es->

419&sa=X&ved=0ahUKEwIU_J3w1sDTAhVEOyYKHDrWBgYQ6AEIJAB#v=onepage&q=oxigeno disuelto en aguas residuales&f=false

Drever, J. (1988). *The Geochemistry of Natural Waters* (2nd ed.). New Jersey: Prentice Hall.

Durkin, T., & Herrmann, J. (1994). Focusing on the problem of mining wates: an introduction to acid mine drainage. *Environmental Protection Agency*, 1–4.

Favas, P. J. C., Sarkar, S. K., Rakshit, D., Venkatachalam, P., & Prasad, M. N. V. (2016). *Acid Mine Drainages From Abandoned Mines: Hydrochemistry, Environmental Impact, Resource Recovery, and Prevention of Pollution. Environmental Materials and Waste*. Elsevier Inc. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00017-2>

Ferguson, K., & Erickson, P. (1987). Will it generate AMD. An overview of methods to predict acid mine drainage. *British Columbia Mine Reclamation Symposium*, 41–70.

Flores López, P., & Gonzalez Taboada, I. (2002, October). Impacto Ambiental en la Minería Peruana, 1–14. Retrieved from <http://geoecolima.tripod.com/archiv/medioamb.pdf>.

Gould, D. (1996). *The Role of Microbiology in the Prevention and Treatment of Acid Mine Drainage*. CANMET/CETEM, Mining and Environment.

Gray, N. F. (1997). Environmental impact and remediation of acid mine drainage : A management problem. *Environmental Geology*, 30, 63–71.

Guerrero, C., & Zavala, B. (2005). Influencia de la actividad minera en la cuenca del río ramis - puno. *XVIII Congreso Peruano de Geología*, (40), 127–130. Retrieved from [http://bibliotecavirtual.ingemmet.gob.pe:84/xmlui/bitstream/handle/123456789/251/INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD MINERA EN LA CUENCA DEL RÍO RAMIS _PUNO.pdf?sequence=1](http://bibliotecavirtual.ingemmet.gob.pe:84/xmlui/bitstream/handle/123456789/251/INFLUENCIA%20DE%20LA%20ACTIVIDAD%20MINERA%20EN%20LA%20CUENCA%20DEL%20R%C3%83O%20RAMIS%20_PUNO.pdf?sequence=1)

Hassibi, M., & Singh, I. (2014). La preparación de la Lechada de Cal y su impacto en la eficiencia del proceso de flotación y costo de operación. *I International Congress of Minerals Flotation*, 1–12. Retrieved from 166

<http://www.agt.cl/mining/doc/d201410181231es.pdf>

INAP. (1998). The ARD Process. *The International Network for Acid Prevention*.

Jaramillo, M., & Flores, E. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemma minor (Lenteja de agua), y Eichornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera*.

Jiménez, B. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada* (Editorial). México. Retrieved from https://books.google.com.pe/books?id=8MVxlyJGokIC&pg=PA247&lpg=PA247&dq=remocion+de+metales+usando+cal+hidratada&source=bl&ots=ITECTOKzyz&sig=EvcDopssHqzgzC0KJakMqwhEHhk&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjX3c_lor7TAhXCYiYKHYxtDsMQ6AEIUTAH#v=onepage&q=remocion de

Kaifer, J. (2006). *Tratamientos físicos-químicos de residuos*. España. Retrieved from http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45774/componente45772.pdf

Kirschbaum, A., & Murray, J. (1997a). Minería y aguas ácidas: contaminación y prevención, 40–51.

Kirschbaum, A., & Murray, J. (1997b). Minería y aguas ácidas: contaminación y prevención, 40–51.

Kuyucak, N. (2000). Microorganisms, Biotechnology and Acid Rock Drainage - Emphasis on Passive-Biological Control and Treatment Methods. *Minerals and Metallurgical Processing*, 85–95.

Lapakko, K. (2002). Metal Mine Rock and Waste Characterization Tools : An Overview. *Mining, Minerals and Sustainable Development*, 67, 30.

Lee, G., Bigham, J. M., & Faure, G. (2002). Removal of trace metals by coprecipitation with Fe, Al and Mn from natural waters contaminated with acid mine drainage in the Ducktown Mining District, Tennessee. *Applied Geochemistry*, 17(5), 569–581.

- Lee, M., Sung, I., Kim, I., Kang, H., & Leé, S. (2007). Remediation of heavy metal contaminated groundwater originated from abandoned mine using lime and calcium carbonate. *Journal of Hazardous Materials*, *144*, 208–214. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.007>
- Lillo, J. (2008). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*. Retrieved from [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Peligros geoquímicos del arsénico - Javier Lillo.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Peligros%20geoqu%C3%ADmicos%20del%20ars%C3%A9nico%20-%20Javier%20Lillo.pdf)
- López, E., Aduvire, O., & Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina : estado actual y perspectivas de futuro, *113*(1), 3–21.
- Lottermoser, B. (2007). *Mine Wastes: Characterization, Treatment, Environmental Impacts*.
- Lottermoser, B. (2007). *Mine Wastes: Characterization, Treatment, Environmental Impacts* (2ed ed.). Australia: Springer Berlin Heidelberg New York.
- Lottermoser, B. (2011). Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes, 405–410. <http://doi.org/10.2113/gselements.7.6.405>
- Manahan, S. (2007). *Introducción a la química ambiental*. (C. Durán, Ed.) (1ed ed.). México: Editorial Reverté S.A. Retrieved from https://books.google.com.pe/books?id=5NR8DIk1n68C&pg=PA222&lpg=PA222&dq=precipitación+del+magnesio+con+cal&source=bl&ots=k5mgG4uhBf&sig=9JrqzjD94Hi9H8emLJoDKmYxhto&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiHpqL6tsbTAhVDKiYKHT_nBpIQ6AEIMTAD#v=onepage&q=precipitaci%C3%B3n
- Nemerow, N., & Dasgupta, A. (1998). *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. (E. D. de S. S.A., Ed.). Retrieved from <https://books.google.com.pe/books?id=KDMjTWMEuaoC&pg=PA115&lpg=PA115&dq=tratamiento+de+aguas+acidas+con+lechada+de+cal&source=bl&ots=txCXGsuXuq&sig=DpMqaMf4NBNomPjmXsa-a5LB3ok&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwikyODW3NbSAhVHwWMKHVpWDHg4ChDoAQgi>

MAI#v=onepage&q=tra

Nina, M. (2008). *Evaluación de los métodos químicos y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Retrieved from http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/802/1/Nina_cm.pdf

Nordstrom, D., & Alpers, C. (1999). Geochemistry of acid mine waters. In *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits* (Vol. 6A, pp. 133–160). Littleton, Colorado.

Odetti, H., & Bottani, E. (2006). *Introducción a la Química inorgánica*. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral. Retrieved from https://books.google.com.pe/books?id=V3PXbAWLAuQC&pg=PA320&lpg=PA320&dq=precipitacion+de+hidroxido+de+niquel&source=bl&ots=sBx-TAAiTs&sig=3FFY18t6w5Y07lmWWaP5_1QBKtI&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwii9rWhqL7TAhWB6CYKHZkJBi0Q6AEIMjAD#v=onepage&q=precipitacion de

Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero*. Lima. Retrieved from http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d25/067_Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero/guia-mejor_agua_metodocasero.pdf

Ramallo, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. (Reverté S.A, Ed.) (2ed ed.). España: Academic Press Inc. LTD. Retrieved from <https://books.google.com.pe/books?id=30etGjzPXyWC&pg=PA183&dq=ph++para+el+agua&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiSopmohsDTAhWJYyYKHQodCToQ6AEIITAA#v=onepage&q=ph para el agua&f=false>

Romero, F. M., Armienta, M. A., Eugenia, M., & Villaseñor, G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros, *24*(2), 43–54.

- Sánchez, R. (2015). t-Student. Usos y abusos, 26, 59–61. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmc/v26n1/v26n1a9.pdf>
- Skousen, J. G. (2002a). A Brief Overview of Control and Treatment Technologies for Acid Mine Drainage. *American Society of Mining and Reclamation*, 879–899.
- Skousen, J. G. (2002b). Overview of acid mine drainage treatment with chemicals, 1–17. Retrieved from <http://anr.ext.wvu.edu/r/download/118382>
- Skousen, J. G., & Ziemkiewicz, P. F. (1996). Acid mine drainage control and treatment, 356.
- Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R., & Hellier, W. (1998). An Overview of the Abundance, Relative Mobility, Bioavailability, and Human Toxicity of Metals. *The National Mine Land Reclamation Center*, 6, 1–131.
- Smith, T. M., & Smith, R. L. (2007). *Ecología* (6ed ed.). Madrid, España: Pearson Education.
- Taylor, J., Pape, S., & Murphy, N. (2005). A Summary of Passive and Active Treatment Technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD). *Austalian Centre for Minerals Extension and Research*, 29–31.
- Udayabhanu, S., & Prasad, B. (2010). Studies on Environmental Impact of Acid Mine Drainage Generation and its Treatment. *Indian J. Environmental Protection*, 30(11), 953–967. Retrieved from <http://cimfr.csircentral.net/34/1/S31.pdf>
- Valencia, E. (2011). *Química del hierro y manganeso en el agua, métodos de remoción*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/754/1/ti881.pdf>
- Wang, L., Vaccari, D., Li, Y., & Shammas, N. (2005). *Physicochemical Treatment Processes* (3rd ed.). Humana Press. <http://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:141>
- Warhurst, A., & Noronha, L. (1999). *Environmental Policy in Mining: Corporate Strategy and Planning*. New York: Lewis Publishers. Retrieved from

https://books.google.com.pe/books?id=OV1mdNAQtfgC&pg=PA138&lpg=PA138&dq=stages+in+the+formation+of+ARD&source=bl&ots=jlygdPHMKD&sig=KXT6x8iLZiWjc9WtoU4FDjTX-DY&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi1j6PAn_LQAhVN0mMKHWf3DIgQ6AEIUzAH#v=onepage&q&f=false

Wentz, C. (1989). *Hazardous waste management* (1ed ed.). New York: McGraw-Hill College.

Younger, P., Banwart, S., & Hedin, R. (2002). *Mine Water: Hidrology, Pollution and Remediation*. Kluwer Academic.

Zumarán, J., Barbosa, F., De Souza, V., Carvalho, R., & Jimenez, C. (2003). Laboratory Methods for Predicting the Acid Drainage Potential of Coal Mine Wastes, 1–17.

Zumarán, J., Barbosa, O., & De Souza, V. (2004). Métodos de laboratorio para predecir el potencial de drenaje ácido en relaves mineros, 7, 305–315.

ANEXO 1

Ficha Técnica de la Cal

| | | |
|---|--|--|
|  | SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL PRODUCTO | N° : SI-MSDS-01 Fecha: 04-08-2014 Rev. : 02 Página: 1 de 5 Autor: E.Q.M. |
| | CAL VIVA (Óxido de Calcio >78%) | |

| | |
|-------------|----------------------------|
| COPIA Nro. | |
| ASIGNADA A: | COPIA NO CONTROLADA |

| SECCIÓN 1: IDENTIFICACIÓN DE PRODUCTO Y LA COMPAÑÍA | |
|---|---|
| Nombre del Producto | Óxido de Calcio. |
| Nombre Comercial | Cal Viva. |
| Marca | INTICAL |
| Uso de Producto | Insumo Químico |
| Fabricante | Cal y Cemento Sur S.A. Juliaca (051)-328544 – 328545. Arequipa (054)-225000 – 222525. |

Rótulo NFPA



| SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE COMPONENTES | | |
|--|---------------|-------------|
| Nombre Químico: | Número de CAS | Porcentaje |
| Dióxido de silicio (SiO ₂) | 14808-60-7 | 4.0 - 5.5 % |
| Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) | 1377-28-1 | 1.0 - 1.7 % |
| Oxido de calcio (CaO) | 1305-78-8 | >78 % |
| Óxido de magnesio (MgO) | 1309-48-4 | 1.2 - 2.0 % |
| Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃) | - | 0.40 -1.0 % |

| SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS | |
|---|---|
| Contacto con los Ojos | Corrosiva. Irritación severa dependiendo del contacto. Una sobreexposición puede producir dolor, coloración roja, ardor de la córnea y ulceración con posible daño permanente, quemaduras químicas. |
| Contacto con la Piel | Corrosiva. El contacto prolongado y repetido con el material en forma de polvo o húmedo puede producir erupción cutánea y dermatitis quemaduras químicas. |
| Inhalación | Corrosiva. La sobreexposición al polvo puede producir irritación severa de la membrana mucosa de la nariz, por exposición crónica puede causar lesión en el tabique nasal, garganta, tos y bronquitis genérica. |
| Ingestión | Puede causar quemaduras en la boca, garganta y el estómago. Corrosiva. La ingestión puede producir ulceración y ardor en la boca y garganta, náuseas, vómitos, dolor abdominal y diarrea. |
| Peligros especiales del Producto | Reacciona violentamente con agua con gran desprendimiento de calor, aumentando su volumen 2,5 veces. Este calor es suficiente para derretir el envase que lo contiene, puede prender materiales fácilmente inflamables. Puede emitir polvo muy fino, fácil de ser llevado por el viento |

| | | | | | |
|----------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| ELABORADO POR: | FECHA | REVISADO POR: | FECHA | APROBADO POR: | FECHA |
| E.Q.M. | 02-08-14 | W.L.L.F. | 04-08-14 | J.L.H. | 04-08-14 |
| FIRMA | | FIRMA | | FIRMA | |

CONFIDENCIAL: No debe ser copiado sin permiso del ASIG de CAL Y CEMENTO SUR S.A.

| | | |
|---|--|--|
|  | SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL PRODUCTO | N° SI-MSDS-01 Fecha: 04-08-2014 Rev. : 02 Página: 2 de 5 Autor: E.Q.M. |
| | CAL VIVA (Oxido de Calcio >78%) | |

SECCIÓN 4: MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

| | |
|---|--|
| Contacto con los ojos | Verificar si la víctima lleva lentes de contacto y en este caso, retirárselas. En caso de contacto lavar los ojos inmediatamente con abundante agua aproximadamente 10 a 15 min. De ser necesario levantar los párpados para su limpieza con agua y obtener ayuda médica de forma inmediata. |
| Contacto con la piel | En caso de contacto, eliminar el producto seco rápidamente y lavar con abundante agua y jabón. En caso de constatar quemadura llevar rápidamente a un centro médico. Sáquese inmediatamente toda la ropa contaminada, incluyendo los zapatos. Lave completamente las áreas afectadas con abundante jabón (pH neutro) y agua. Si persiste algún efecto, busque atención médica. |
| Inhalación | Traslade al afectado a un lugar ventilado, aplicar primeros auxilios a la víctima sino respira. Mantener signos vitales, trasladar a un centro de asistencia médica |
| Ingestión | No inducir al vómito, no dar a beber líquidos. Si vomita espontáneamente colocar en posición de rescate. |
| Instalación de primeros auxilios | Se debe disponer de instalaciones para el lavado de ojos. |

SECCIÓN 5: MEDIDAS PARA EXTINCIÓN DE INCENDIOS

| | |
|--|--|
| Agente de extinción | El producto no se inflama, use cualquier agente extintor (PQS), apropiado para el fuego circundante. La aplicación de agua puede producir una reacción exotérmica y liberar el calor suficiente para encender materiales combustibles que se encuentren alrededor. |
| Equipo de protección personal para el combate del fuego | Traje para alta temperatura y un equipo de aire autónomo de presión positiva (SCBA). |

SECCIÓN 6: MEDIDAS DE LIBERACIÓN O DERRAME

| | |
|---|--|
| Precauciones individuales | Mantenga alejado al personal que no sea necesario. -No toque el material derramado ni camine sobre él. No toque los recipientes dañados ni el material derramado si no está usando la vestimenta de protección adecuada. |
| Medidas de emergencia a tomar si hay derrame de material | Aislar, represar, recuperar la mayor parte del producto derramado. |
| Equipo de protección persona para atacar la emergencia | Traje de nivel de protección C (Aparato Autónomo de Respiración o mascara facial con filtro químico, ropa contra salpicaduras químicas, guantes internos y externos, botas resistentes a productos químicos). |
| Precauciones para la protección del medio ambiente | Evite la dispersión del material derramado, recoger en contenedores y cerrar para su disposición. No eliminar en lagos y arroyos, limpie el suelo de forma adecuada. |
| Métodos de limpieza | Recoger todo lo que quede y lo envasa en recipientes plásticos para su internamiento y luego su tratamiento. |



SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN
HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL PRODUCTO

Nº SI-MSDS-01
 Fecha: 04-08-2014
 Rev. : 02
 Página: 3 de 5
 Autor: E.Q.M.

CAL VIVA
(Óxido de Calcio >78%)

SECCIÓN 7: MANEJO Y ALMACENAMIENTO

| | |
|--------------------------------------|--|
| Condiciones de Almacenamiento | Almacenar en ambiente seco, fresco y bien ventilado. Segregar de sustancias incompatibles. Disponer de lavaojos, mantener el producto en lugares secos, Manténgase el recipiente bien cerrado. |
| Manipulación | Usar ropa de protección personal básica (zapatos de seguridad, guantes, respirador, lentes de seguridad, ropa protectora). Manipular en ambientes ventilados. |
| Precauciones a tomar | Evitar contacto corporal. |

SECCIÓN 8: CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL

| | |
|---|---|
| Medidas para reducir la posibilidad de exposición. | Trabajar en un lugar con buena ventilación. Evitar el contacto físico, utilizar los elementos de protección adecuados. |
| Ventilación | Local y general. |
| Protección Respiratoria | De acuerdo a la concentración del producto seleccionar la protección respiratoria, en emergencias y en operaciones no rutinarias usar filtros para material particulado de alta eficiencia. |
| Guantes de protección | Material a considerar Neopreno o PVC, caña larga. |
| Ojos | Antiparras con ventilación indirecta y con banda de exudación, o asociadas a la protección respiratoria cara completa. |
| Piel | Calzado de seguridad, casco de seguridad, guantes, ropa de protección adecuada. Lávese completamente después del trabajo. Lave regularmente la ropa de trabajo. |
| Otros equipos de protección | Botas y overol adecuados a las operaciones de material igual o similar a los guantes. |

SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

| | |
|----------------------------|--|
| Estado físico | Sólido, polvo, gránulos. |
| Concentración | Mayor a 78% de cal Útil. |
| Color | Blanco gris. |
| Olor | Sin olor |
| Punto de fusión | 2580 °C |
| Punto de ebullición | 2850 °C |
| Densidad relativa | 3.37 g/cm ³ a 20°C |
| Densidad aparente | 800 – 1200 Kg/m ³ |
| Masa molar | 56.07 g/mol |
| Solubilidad | 1.65 g/l. (20°C), reacciona con el agua para formar hidróxido de calcio, riesgo de reacción con liberación de calor. |
| Valor de pH | 12.6 (H ₂ O, 20 °C) (solución saturada) |

CONFIDENCIAL: No debe ser copiado sin permiso del ASIG de CAL Y CEMENTO SUR S.A.

| | | |
|---|--|--|
|  | SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL PRODUCTO | N° SI-MSDS-01 Fecha: 04-08-2014 Rev. : 02 Página: 4 de 5 Autor: E.Q.M. |
| | CAL VIVA (Óxido de Calcio >78%) | |

SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

| | |
|---|---|
| Estabilidad y reactividad | Producto estable, excepto en presencia de agua produciendo una reacción exotérmica. |
| Incompatibilidad con diferentes sustancias | Agua, ácidos, inter halógenos, óxido de fósforo V. |
| Descomposición o sub productos peligrosos | Ninguna. |
| Producto peligroso de la combustión | No aplica. |
| Polimerización peligrosa | No se producirá. |
| Condiciones de reactividad | No disponible. |

SECCIÓN 11: INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

| | |
|------------------------|--|
| Efectos agudos | El contacto prolongado puede irritar o quemar la piel especialmente con la presencia de humedad. La inhalación del polvo puede causar irritación de las mucosas, membranas respiratorias. Contacto directo con los ojos puede causar daños permanentes. |
| Efectos crónico | La exposición prolongada causa irritación, ulceración y perforación del tabique nasal. |
| Efectos locales | Irritación severa, quemaduras, bronquitis y neumonías. 10 a 20 mg/m ³ : Puede causar quemaduras en la nariz y garganta. 40 a 60 mg/m ³ : Puede ser fatal. Existen antecedentes de dermatitis con daño e incapacidad permanente. |
| Ruta de entrada | Inhalación, absorción a través de la piel, ingestión. |
| Órganos vitales | Los daños se causan a nivel del tracto respiratorio superior, piel, ojo (cristalino o córnea) y aparato digestivo. |

SECCIÓN 12: INFORMACIÓN ECOLÓGICA

| | |
|--------------------------------------|---|
| Inestabilidad | Este producto es estable bajo condiciones normales. |
| Persistencia / Degradabilidad | En concentraciones menores la cal viva al hidratarse y absorber el anhídrido carbónico del ambiente, se transforma en un material que puede incorporarse al estrato del suelo, degradable hasta inerte. |
| Bioacumulación | No Aplica. |
| Efectos sobre el ambiente | Nocivo para el medio ambiente, debido al incremento de temperatura y elevación del pH del agua, lo cual afectará a organismos vivos sensibles a estos cambios bruscos. |

SECCIÓN 13: CONSIDERACIONES DE ELIMINACIÓN

| | |
|--|---|
| Eliminación del producto | Absorber todo el material residual y envasarlo en recipientes plásticos etiquetados como corresponde, los envases se lavan con suficiente agua y esta luego se neutraliza. |
| Eliminación de envases y embalajes contaminados | Disponer los envases según política interna de la empresa lavado y reciclado. |
| Métodos de eliminación de desechos | Cualquier polvillo residual lo diluye con agua y lo trata con una solución diluida de ácidos sulfúrico, ajustar pH a 7, luego recoger todo y envasar para disponer en vertedero autorizado. |

CONFIDENCIAL: No debe ser copiado sin permiso del ASIG de CAL Y CEMENTO SUR S.A.

| | | |
|---|--|--|
|  | SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL PRODUCTO | N° SI-MSDS-01 Fecha: 04-08-2014 Rev. : 02 Página: 5 de 5 Autor: E.Q.M. |
| | CAL VIVA (Óxido de Calcio >78%) | |

SECCIÓN 14: INFORMACIÓN SOBRE EL TRANSPORTE

| | | |
|---|--|--|
| Para su manejo, transporte terrestre | Manejarlo en silos o sacos impermeables. | |
| Nch 2190 Transporte de productos peligrosos. | Uso de rombo de corrosivo y UN 1910, aislar de las condiciones meteorológicas. | |
| NAERG (Guía Norteamericana de Respuesta a Emergencias) | 154 | |
| Número Naciones Unidas NU | 1910 | |
| Información reglamentaria | Clasificación UN / IMDG / IATA: Corrosive, solid, basic, inorganic N.O.S. (óxido de calcio) Clase: 8 Número: UN3262. ONU GE: III |  |
| | Clasificación DOT: Corrosive, solid, basic, inorganic N.O.S. (óxido de calcio) Clase: 8 Número: UN3262. ONU GE: III |  |
| | Clasificación TDG: Corrosive, solid, basic, inorganic N.O.S. (óxido de calcio) Clase: 8 Número: UN3262. ONU GE: III |  |

SECCIÓN 15: INFORMACIÓN REGULADORA

| | |
|--|---|
| Norma Nacional aplicable | D.L. 1126 Que establece medidas de control en los insumos químicos y productos fiscalizados, maquinarias y equipos utilizados para la elaboración de drogas ilícitas. |
| Normas internacionales aplicables | OSHA, ACGIH, NFPA, ASTM, NIOSH. |

SECCION 16: OTRA INFORMACIÓN

- La información relacionada con este producto puede ser no valida si este es usado en combinación con otros materiales. Es responsabilidad del usuario la interpretación y aplicación de esta información para su uso particular.

Consultar la vigencia de la hoja de seguridad al área de Administración del Sistema Integrado de Gestión (ASIG) de CAL Y CEMENTO SUR S.A. (Telf. 328544, anexo 4630).

| N° Revisión | Control de cambios del documento |
|-------------|--|
| 02 | En el encabezado se modificó el logo por:  En el pie de página se cambió: modifico CEMENTO SUR S.A. por CAL Y CEMENTO SUR S.A. En la sección 1 se cambió referencia a: Cemento Sur S.A. por Cal y Cemento Sur S.A. En la sección 16 se cambió referencia a: CESUR por CAL Y CEMENTO SUR S.A. |

CONFIDENCIAL: No debe ser copiado sin permiso del ASIG de CAL Y CEMENTO SUR S.A.

ANEXO 2

Resultado de ensayo de laboratorio



Muestras del Grupo: 1122/2016

N° ALS - Corplab

Fecha de Muestreo

Hora de Muestreo

Tipo de Muestra

Identificación

| | | | | 13668/2016-1.0 | 13671/2016-1.0 | 13672/2016-1.0 | 13676/2016-1.0 | 13677/2016-1.0 |
|--|----------------|-------------|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | | 11/01/2016 | 11/01/2016 | 11/01/2016 | 11/01/2016 | 11/01/2016 |
| | | | | 07:40:00 | 08:30:00 | 08:50:00 | 09:15:00 | 10:10:00 |
| | | | | Agua Residual Industrial |
| | | | | INGRESO | 1 ETP-S | 2 ETP-S | 2 ETP-R | 2 ETP-CAL |
| Método de Análisis | Parámetro | Unidad | LD | | | | | |
| 001 DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE | | | | | | | | |
| Conductividad - Proporcionado por el cliente* | Conductividad* | uS/cm | --- | 1510,0 | 7930,0 | 9190,0 | 8520,0 | 7850,0 |
| pH - Proporcionado por el cliente* | pH* | Unidades pH | --- | 3,01 | 8,82 | 8,35 | 8,85 | 8,06 |
| 007 ANALISIS DE METALES TOTALES | | | | | | | | |
| Metales Totales | Aluminio (Al) | mg/L | 0,009 | 549,8 | 24,64 | 0,396 | 0,114 | 0,400 |
| Metales Totales | Antimonio (Sb) | mg/L | 0,006 | <0,006 | <0,006 | <0,006 | <0,006 | <0,006 |
| Metales Totales | Arsenico (As) | mg/L | 0,010 | <0,010 | <0,010 | <0,010 | <0,010 | <0,010 |
| Metales Totales | Bario (Ba) | mg/L | 0,003 | 0,036 | 0,047 | 0,063 | 0,068 | 0,088 |
| Metales Totales | Berilio (Be) | mg/L | 0,001 | 0,076 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Metales Totales | Bismuto (Bi)* | mg/L | 0,031 | <0,031 | <0,031 | <0,031 | <0,031 | <0,031 |
| Metales Totales | Boro (B) | mg/L | 0,010 | 0,720 | <0,010 | 0,010 | 0,012 | 0,014 |
| Metales Totales | Cadmio (Cd) | mg/L | 0,003 | 0,134 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 |
| Metales Totales | Calcio (Ca) | mg/L | 0,10 | 377,9 | 637,3 | 770,5 | 667,4 | 697,4 |
| Metales Totales | Cobalto (Co) | mg/L | 0,007 | 2,214 | <0,007 | <0,007 | <0,007 | 0,022 |
| Metales Totales | Cobre (Cu) | mg/L | 0,003 | 16,82 | 0,013 | 0,015 | 0,034 | 0,043 |
| Metales Totales | Cromo (Cr) | mg/L | 0,009 | 0,446 | <0,009 | <0,009 | <0,009 | <0,009 |
| Metales Totales | Estaño (Sn) | mg/L | 0,044 | <0,044 | <0,044 | <0,044 | <0,044 | <0,044 |
| Metales Totales | Estroncio (Sr) | mg/L | 0,003 | 0,560 | 0,652 | 0,675 | 0,639 | 0,745 |
| Metales Totales | Fosforo (P) | mg/L | 0,15 | 10,53 | <0,15 | <0,15 | <0,15 | <0,15 |
| Metales Totales | Hierro (Fe) | mg/L | 0,030 | 923,5 | <0,030 | 0,105 | <0,030 | 1,489 |
| Metales Totales | Litio (Li) | mg/L | 0,040 | <0,040 | <0,040 | 0,073 | 0,068 | 0,107 |
| Metales Totales | Magnesio (Mg) | mg/L | 0,040 | 174,3 | 3,599 | 76,33 | 81,28 | 135,2 |
| Metales Totales | Manganeso (Mn) | mg/L | 0,015 | 30,18 | <0,015 | 0,635 | 0,209 | 0,887 |
| Metales Totales | Molibdeno (Mo) | mg/L | 0,018 | <0,018 | <0,018 | <0,018 | <0,018 | <0,018 |
| Metales Totales | Niquel (Ni) | mg/L | 0,002 | 3,208 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | 0,020 |
| Metales Totales | Plata (Ag) | mg/L | 0,010 | <0,010 | <0,010 | <0,010 | <0,010 | <0,010 |
| Metales Totales | Plomo (Pb) | mg/L | 0,008 | <0,008 | <0,008 | <0,008 | <0,008 | <0,008 |
| Metales Totales | Potasio (K) | mg/L | 0,70 | 2,65 | 73,01 | 29,44 | 79,82 | 46,07 |
| Metales Totales | Selenio (Se) | mg/L | 0,010 | <0,010 | <0,010 | <0,010 | <0,010 | <0,010 |
| Metales Totales | Silicio (Si)* | mg/L | 0,038 | 39,16 | 0,095 | 0,763 | 1,863 | 1,249 |
| Metales Totales | Sodio (Na) | mg/L | 0,10 | 18,88 | 23,52 | 18,42 | 22,82 | 28,09 |
| Metales Totales | Talio (Tl) | mg/L | 0,040 | <0,040 | <0,040 | <0,040 | <0,040 | <0,040 |
| Metales Totales | Titanio (Ti) | mg/L | 0,030 | <0,030 | <0,030 | <0,030 | <0,030 | <0,030 |
| Metales Totales | Vanadio (V) | mg/L | 0,010 | 0,110 | 0,019 | 0,021 | 0,018 | 0,019 |
| Metales Totales | Zinc (Zn) | mg/L | 0,022 | 12,98 | <0,022 | <0,022 | <0,022 | 0,110 |

Observaciones

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL - DA

ANEXO 3

Resultados de análisis pre y post tratamiento



Muestras del Grupo: 13199/2016

N° ALS - Corplab

Fecha de Muestreo

Hora de Muestreo

Tipo de Muestra

| | | | | 141992/2016-1.0 | 141995/2016-1.0 |
|--|-------------------|-------------|--------|---|--|
| | | | | 14/04/2016 | 14/04/2016 |
| | | | | 09:30:00 | 09:00:00 |
| | | | | Agua Residual Industrial | Agua Residual Industrial |
| Identificación | | | | E-2 (Agua sin tratar de sub drenaje de Botadero Jesica) | E-1 (Agua tratada de sub drenaje de Botadero Jesica) |
| Método de Análisis | Parámetro | Unidad | LD | | |
| 001 DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE | | | | | |
| Conductividad - Proporcionado por el cliente* | Conductividad* | mS/cm | --- | 14,87 | 3,14 |
| Oxígeno Disuelto - Proporcionado por el cliente* | Oxígeno Disuelto* | mg/L | --- | 1,29 | 5,54 |
| pH - Proporcionado por el cliente* | pH* | Unidades pH | --- | 2,18 | 8,10 |
| 007 ANALISIS DE METALES TOTALES | | | | | |
| Metales Totales | Aluminio (Al) | mg/L | 0,009 | 1963 | 0,769 |
| Metales Totales | Antimonio (Sb) | mg/L | 0,006 | < 0,006 | < 0,006 |
| Metales Totales | Arsenico (As) | mg/L | 0,010 | < 0,010 | < 0,010 |
| Metales Totales | Bario (Ba) | mg/L | 0,003 | 0,046 | 0,041 |
| Metales Totales | Berilio (Be) | mg/L | 0,001 | 0,305 | < 0,001 |
| Metales Totales | Bismuto (Bi)* | mg/L | 0,031 | < 0,031 | < 0,031 |
| Metales Totales | Boro (B) | mg/L | 0,010 | 5,515 | < 0,010 |
| Metales Totales | Cadmio (Cd) | mg/L | 0,003 | 0,279 | < 0,003 |
| Metales Totales | Calcio (Ca) | mg/L | 0,10 | 417,0 | 547,2 |
| Metales Totales | Cobalto (Co) | mg/L | 0,007 | 8,547 | 0,009 |
| Metales Totales | Cobre (Cu) | mg/L | 0,003 | 33,87 | 0,018 |
| Metales Totales | Cromo (Cr) | mg/L | 0,009 | 1,975 | < 0,009 |
| Metales Totales | Estaño (Sn) | mg/L | 0,044 | < 0,044 | < 0,044 |
| Metales Totales | Estroncio (Sr) | mg/L | 0,003 | 0,477 | 0,723 |
| Metales Totales | Fosforo (P) | mg/L | 0,15 | 90,94 | < 0,15 |
| Metales Totales | Hierro (Fe) | mg/L | 0,030 | 5216 | 0,893 |
| Metales Totales | Litio (Li) | mg/L | 0,040 | < 0,040 | 0,054 |
| Metales Totales | Magnesio (Mg) | mg/L | 0,040 | 665,6 | 109,5 |
| Metales Totales | Manganeso (Mn) | mg/L | 0,015 | 115,9 | 1,484 |
| Mercurio Total | Mercurio (Hg) | mg/L | 0,0001 | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Metales Totales | Molibdeno (Mo) | mg/L | 0,018 | < 0,018 | < 0,018 |
| Metales Totales | Niquel (Ni) | mg/L | 0,002 | 12,39 | 0,012 |
| Metales Totales | Plata (Ag) | mg/L | 0,010 | < 0,010 | < 0,010 |
| Metales Totales | Plomo (Pb) | mg/L | 0,008 | < 0,008 | < 0,008 |
| Metales Totales | Potasio (K) | mg/L | 0,70 | < 0,70 | 52,05 |
| Metales Totales | Selenio (Se) | mg/L | 0,010 | < 0,010 | < 0,010 |
| Metales Totales | Silicio (Si)* | mg/L | 0,038 | 91,11 | 0,206 |
| Metales Totales | Sodio (Na) | mg/L | 0,10 | 17,95 | 26,75 |
| Metales Totales | Talio (Tl) | mg/L | 0,040 | < 0,040 | < 0,040 |
| Metales Totales | Titanio (Ti) | mg/L | 0,030 | < 0,030 | < 0,030 |
| Metales Totales | Vanadio (V) | mg/L | 0,010 | 1,258 | 0,016 |
| Metales Totales | Zinc (Zn) | mg/L | 0,022 | 46,97 | < 0,022 |

Observaciones

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL - DA