



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

“REMOCIÓN DE IONES DISUELTOS EN EFLUENTES MINEROS POR PROCESOS DE
ULTRAFILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA EN LA UNIDAD MINERA CATALINA
HUANCA, AYACUCHO - 2020”

Línea de investigación: Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar Título Profesional Ingeniero Ambiental

Autor:

López Santillana, Hemmelig Carolina

Asesor:

Mendoza García José Tomás
(ORCID: 0000-0002-5205-8429)

Jurado:

Aylas Humareda María del Carmen
Aparicio Ilazaca Roxana Clara Yaquely
Loroña Calderón Frank Edgar

Lima – Perú

2022

Dedicatoria:

Dedico esta tesis en primer lugar a Dios, que me brindó la fortaleza y salud para seguir adelante, jamás me soltó y guía cada paso que doy.

A las personas más importantes de mi vida: mis padres a los que siempre me inyectaron los deseos de superación, a mis hermanas y a mis hijos; en especial a Brisa y Bruno quienes son la razón, el motor y la fuerza; mucho de mis logros se los debo a ustedes entre lo que se incluye la presente tesis.

Reconocimiento:

Agradezco a todas las personas que me apoyaron a concretar mi tesis, ya sea motivándome o con sus amplios conocimientos; entre ellos a mis padres, a mi asesor, Francois y Omar.

Índice

Índice.....	4
Índice de tablas.....	7
Índice de figuras.....	8
Resumen.....	12
Abstract.....	13
I. Introducción.....	14
1.1 Descripción y formulación del problema.....	16
1.1.1 Problema General	17
1.1.2 Problemas específicos.....	17
1.2 Antecedentes	18
1.2.1 Antecedentes internacionales.....	18
1.2.2 Antecedentes Nacionales	26
1.3 Objetivos	29
1.3.1 Objetivo general.....	29
1.3.2 Objetivos específicos.....	29
1.4 Justificación	29
1.5 Hipótesis.....	30
1.5.1 Hipótesis general	30
1.5.2 Hipótesis específicas.....	31
II. Marco teórico.....	32
2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación	32
2.1.1 Remoción de iones.....	32
2.1.2 Efluentes mineros	32
2.1.3 Filtración de líquidos	38

2.1.4	Filtración por membranas	41
2.2	Marco conceptual:.....	47
2.3	Marco legal	68
III.	Método.....	72
3.1	Tipo de investigación	72
3.2	Ámbito temporal y espacial	72
3.2.1	Ámbito espacial	72
3.2.2	Ámbito temporal.....	72
3.3	Variables	73
3.4	Población y muestra.....	75
3.4.1	Población	75
3.4.2	Muestra	75
3.5	Instrumentos.....	75
3.6	Procedimientos.....	75
3.7	Análisis de datos	77
IV.	Resultados	78
4.1	Objetivo 1: Resultados del pretratamiento.....	78
4.1.1	Prueba piloto N° 1	78
4.1.2	Prueba piloto N° 2	88
4.1.3	Prueba piloto N° 3	97
4.2	Objetivo 2: Obtención del pH óptimo en los tres pilotos.....	107
4.3	Objetivo 3: Eficiencias en la remoción de iones disueltos.....	108
4.4	Contrastación de hipótesis	110
4.4.1	Estadística descriptiva	110
4.4.2	Análisis inferencial	117

4.4.3	Contrastación de hipótesis de la investigación	118
V.	Discusión de resultados	120
VI.	Conclusiones.....	122
VII.	Recomendaciones.....	124
VIII.	Referencias	126
IX.	Anexos.....	129
	A. Límites Máximos Permisibles: D.S N° 010-2010-MINAM.....	129
	B. Matriz de Consistencia.....	130

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Concentraciones fisicoquímicas en ARI</i>	68
Tabla 2 <i>Concentraciones (mg/L) de metales pesados en ARI</i>	68
Tabla 3 <i>Concentraciones (mg/L) de metales pesados en ARI</i>	68
Tabla 5 <i>Pruebas a nivel piloto</i>	78
Tabla 6 <i>Prueba 1, concentraciones de pretratamiento y permeado 1</i>	79
Tabla 7 <i>Prueba 1 concentraciones del permeado 1 y permeado 2</i>	79
Tabla 8 <i>Prueba 2, pretratamiento, permeado 1</i>	88
Tabla 9 <i>Prueba 2, permeado 1 – permeado 1</i>	89
Tabla 10 <i>Prueba 3, pretratamiento, permeado 1</i>	97
Tabla 11 <i>Prueba 3, permeado 1 – permeado 2</i>	98
Tabla 12 <i>pH para las tres pruebas piloto</i>	107
Tabla 13 <i>Eficiencia de la prueba piloto 1</i>	108
Tabla 14 <i>Eficiencia de la prueba piloto 2</i>	109
Tabla 15 <i>Eficiencia de la prueba piloto 3</i>	110
Tabla 16 <i>Piloto 1, pH inicial 7.5 final 9</i>	111
Tabla 17 <i>Piloto 2, pH inicial 8.0 – pH final 10.74</i>	113
Tabla 18 <i>pH inicial 8.5 – pH fina 10.37</i>	115
Tabla 19 <i>Prueba de hipótesis</i>	118
Tabla 20 <i>Contrastación de hipótesis</i>	119

Índice de figuras

Figura 1 <i>Principio de la filtración tangencial (en tubo)</i>	39
Figura 2 <i>Clasificación de las técnicas de separación en base al tamaño de las especies a filtrar y a factores operacionales</i>	40
Figura 3	50
Figura 4 <i>Unidad de sedimentación</i>	51
Figura 5 <i>Especificaciones de filtros disco</i>	52
Figura 6 <i>Unidad de macrofiltración</i>	53
Figura 7 <i>Especificaciones de módulo membrana de UF</i>	54
Figura 8 <i>Especificaciones técnicas de módulo membrana de UF</i>	55
Figura 9 <i>Unidad de macro filtración</i>	55
Figura 10 <i>Especificaciones de módulo membrana de RO 1- RO 2</i>	57
Figura 11 <i>Especificaciones técnicas de módulo membrana de RO 1- RO 2</i>	58
Figura 12 <i>Unidad de ósmosis inversa</i>	58
Figura 13 <i>Unidad de evaporación MVR</i>	61
Figura 14 <i>Diagrama general de proceso de evaporación</i>	64
Figura 15 <i>PTAM LAMELLAR</i>	66
Figura 16 <i>Clarificador LAMELAR</i>	67
Figura 17 <i>Unidad de decantación macro filtrac</i>	67
Figura 18 <i>LMP para descargas de efluentes de actividad minero metalúrgico</i>	70
Figura 19 <i>LMP de parámetros de calidad organoléptica</i>	71
Figura 20 <i>LMP de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos</i>	71
Figura 21 <i>Operacionalización de las variables</i>	74
Figura 22 <i>Prueba piloto 1, arsénico</i>	80
Figura 23 <i>Prueba piloto 1, potasio</i>	81

Figura 24 <i>Prueba piloto 1, sodio</i>	81
Figura 25 <i>Prueba piloto 1, magnesio</i>	82
Figura 26 <i>Prueba piloto 1, calcio</i>	82
Figura 27 <i>Prueba piloto 1, estroncio</i>	83
Figura 28 <i>Prueba piloto 1, carbonatos</i>	83
Figura 29 <i>Prueba piloto 1, bicarbonatos</i>	84
Figura 30 <i>Prueba piloto 1, cloruro</i>	84
Figura 31 <i>Prueba piloto 1, sulfatos</i>	85
Figura 32 <i>Prueba piloto 1, boro</i>	85
Figura 33 <i>Prueba piloto 1, CO₂</i>	86
Figura 34 <i>Prueba piloto 1, TDS</i>	86
Figura 35 <i>Prueba piloto 1, pH</i>	87
Figura 36 <i>Prueba piloto 1, conductividad eléctrica</i>	87
Figura 37 <i>Prueba piloto 2, arsénico</i>	90
Figura 38 <i>Prueba piloto 2, potasio</i>	90
Figura 39 <i>Prueba piloto 2, sodio</i>	91
Figura 40 <i>Prueba piloto 2, magnesio</i>	91
Figura 41 <i>Prueba piloto 2, calcio</i>	92
Figura 42 <i>Prueba piloto 2, estroncio</i>	92
Figura 43 <i>Prueba piloto 2, carbonatos</i>	93
Figura 44 <i>Prueba piloto 2, bicarbonatos</i>	93
Figura 45 <i>Prueba piloto 2, cloruro</i>	94
Figura 46 <i>Prueba piloto 2, sulfatos</i>	94
Figura 47 <i>Prueba piloto 2, boro</i>	95
Figura 48 <i>Prueba piloto 2, CO₂</i>	95

Figura 49 Prueba piloto 2, STD	96
Figura 50 Prueba piloto 2, pH	96
Figura 51 Prueba piloto 2, conductividad eléctrica	97
Figura 52 Prueba piloto 3, arsénico	99
Figura 53 Prueba piloto 3, potasio	100
Figura 54 Prueba piloto 3, sodio	100
Figura 55 Prueba piloto 3, magnesio.....	101
Figura 56 Prueba piloto 3, calcio	102
Figura 57 Prueba piloto 3, estroncio	102
Figura 58 Prueba piloto 3, carbonatos	103
Figura 59 Prueba piloto 3, bicarbonatos	103
Figura 60 Prueba piloto 3 cloruro	104
Figura 61 Prueba piloto 3, sulfatos.....	104
Figura 62 Prueba piloto 3, boro	105
Figura 63 Prueba piloto 3, CO ₂	105
Figura 64 Prueba piloto 3, STD	106
Figura 65 Prueba piloto 3, pH	106
Figura 66 Prueba piloto 3, conductividad eléctrica	107
Figura 67 Comportamiento del pretratamiento, piloto 1	112
Figura 68 Comportamiento final, piloto 1	112
Figura 69 Conductividad, piloto 1	113
Figura 70 Comportamiento del pretratamiento, piloto 2	114
Figura 71 Comportamiento final, piloto 2	114
Figura 72 Conductividad, piloto 2	115
Figura 73 Comportamiento del pretratamiento, piloto 3	116

Figura 74 <i>Comportamiento fina, piloto 3</i>	116
Figura 75 <i>Conductividad, piloto 3</i>	117

Resumen

El presente estudio, Remoción de iones disueltos en efluentes mineros por procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa en la unidad minera Catalina Huanca, Ayacucho – 2020, tuvo como objetivo principal, remover los iones disueltos presentes en los efluentes mineros mediante procesos combinados de ultrafiltración y ósmosis inversa en la unidad minera “Catalina Huanca”. La metodología, fue de tipo aplicada – experimental mediante el cual se busca encontrar conocimientos que puedan resolver el problema además de comprobar el comportamiento de las variables, la investigación se llevó a cabo entre los meses de enero y setiembre del año 2020; las concentraciones de los parámetros químicos y fisicoquímicos, fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles (D.S. N° 010-2010-MINAM) y con el Reglamento de la Calidad del Agua para consumo humano (D.S. 031-2010-SA), se comprueba que efectivamente existe disminución máxima entre la combinación de tratamientos de ultrafiltración y ósmosis inversa esto ratificado para todos los parámetros por la prueba T de Student para una muestra, en la cual se concluye por la $sig.>0.05$, que todos los parámetros presentan disminución significativa y fundamentalmente el piloto de prueba 1 el cual presenta mayor remoción en los parámetros estudiados y dentro del pH normado en los LMP. Por tanto, se valida y se recomienda a las empresas mineras la implementación del ósmosis inversa como método combinado, eficiente y de aceptable operación, para cumplir con todos los parámetros exigidos por la normatividad vigente.

Palabras claves: remoción, efluentes mineros, ultrafiltración, ósmosis inversa.

Abstract

The present study, Removal of dissolved ions in mining effluents by ultrafiltration and reverse osmosis processes in the Catalina Huanca mining unit, Ayacucho - 2020, had as its main objective, to remove the dissolved ions present in mining effluents through combined ultrafiltration and osmosis processes reverse in the “Catalina Huanca” mining unit. The methodology was of an applied - experimental type through which it seeks to find knowledge that can solve the problem in addition to checking the behavior of the variables, the research was carried out between the months of January and September of the year 2020; the concentrations of the chemical and physicochemical parameters were compared with the Maximum Permissible Limits (DS N ° 010-2010-MINAM) and with the Regulation of the Quality of Water for human consumption (DS 031-2010-SA), it is verified that Indeed, there is a maximum decrease between the combination of ultrafiltration and reverse osmosis treatments, this ratified for all the parameters by the Student's t test for a sample, in which it is concluded by the $\text{sig.} > 0.05$, that all the parameters present a significant decrease and fundamentally the test pilot 1 which presents greater removal in the parameters studied and within the pH regulated in the LMP. Therefore, the implementation of reverse osmosis as a combined, efficient and acceptable operation method is validated and recommended to mining companies, to comply with all the parameters required by current regulations.

Key words: removal, mining effluents, ultrafiltration, reverse ósmosis.

I. INTRODUCCIÓN

La presente tesis desarrolla una investigación sobre *Tratamiento avanzado de efluentes mineros para la remoción de metales pesados y salinidad en la unidad minera Catalina Huanca, Ayacucho – 2020*, dado que existe actualmente una preocupación a nivel mundial sobre la gravedad que han alcanzado los diferentes problemas ambientales que afligen al planeta, como lo es contaminación de cuerpos hídricos por efluentes mineros.

La minería cumple un rol fundamental en la economía de los países del mundo, dentro de ellos se encuentra el Perú, donde constituye un gran factor de desarrollo. Siendo el primer proveedor de divisas aporta hoy más del 60% del total de nuestros ingresos por exportaciones; sin embargo, es también un generador de residuos, los cuales, si no son adecuadamente manejados, generan impactos ambientales irreversibles y que podrían permanecer aun después del cierre de minas. En general los efluentes mineros, relaves y desmontes de mina pueden contener sulfuros metálicos que, al estar expuestos al oxígeno de la atmósfera, son oxidados produciendo los drenajes ácidos de mina, también es el caso de los metales en solución como el plomo, iniciando una fuente de contaminación que luego es muy difícil y costoso controlar.

En la eliminación de contaminantes metálicos se han aplicado tanto métodos físicos como químicos; sin embargo, todos presentan desventajas, entre ellas su alta relación costo-efectividad, la generación de subproductos peligrosos o su ineficiencia cuando la concentración de metales en los entornos contaminados está por debajo de 100 ppm³. En la actualidad los metales pesados son los contaminantes más tóxicos que contienen los efluentes, relaves y residuos mineros, lo que ha llegado a ser un gran problema.

Existen varios tratamientos que se pueden emplear para los efluentes mineros, cuya finalidad es la detoxificación y la reducción de volumen de los contaminantes previa a su vertimiento en algún cuerpo receptor; usando para ello la remoción de metales pesados con la

implementación de algunos tratamientos. Por lo que, siendo la contaminación por vertimientos de efluentes mineros, una de las problemáticas de primer orden en nuestro país, la cual está generando un impacto drástico en ríos, lagos y lagunas, así como en terrenos de cultivo de los principales valles agrícolas del Perú; razón por la cual la presente investigación desarrolla una alternativa de tratamiento avanzado de estos efluentes mineros para la remoción de metales pesados y salinidad en la unidad minera (UM) de Catalina Huanca ubicada en el departamento de Ayacucho; con la preocupación de todo lo expuesto el objetivo de la presente investigación fue Aplicar un tratamiento avanzado por procesos combinados de ultrafiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de efluentes en la UM Catalina Huanca.

Esta tesis está organizada de la siguiente manera: Partes iniciales: carátula, dedicatoria, agradecimiento, índice e introducción. contenido temático: dividido en cuatro capítulos:

- Capítulo I: planteamiento del problema, que incluye caracterización del problema, formulación del problema general y problemas específicos, presentación del objetivo general y objetivos específicos, así como la justificación, importancia y limitaciones del presente estudio.
- Capítulo II: marco teórico, que está enfocado con sus referentes teóricos, marco conceptual y luego el marco legal que indica las normas consideradas para fundamentar el presente estudio; además el marco conceptual, que establece los principales conceptos.
- Capítulo III: método. que enfocan toda la metodología de la investigación: tipo de investigación, diseño, ámbito temporal y espacial, variables, población y muestra instrumentos y procedimientos.
- Capítulo IV: resultados obtenidos. Los resultados son la demostración de la posibilidad de aplicar el estudio y comprobar que lo propuesto es conveniente. Queda

en vuestras entendidas manos para las observaciones y correcciones de estilo, a fin de poder mejorar y ampliar la presente investigación.

- Capítulo V: contrastación de hipótesis. Se verifica el comportamiento de los resultados, para luego realizar un análisis inferencial utilizando la prueba T-student a fin de poder contrastar la hipótesis.
- Capítulo VI: discusión de resultados. Se verifica los resultados con la literatura previa (antecedentes).
- Capítulo VII: conclusiones. Se presenta las conclusiones de la investigación a fin de determinar la factibilidad del estudio a escala piloto.
- Capítulo VIII: recomendaciones. Se presenta la sugerencia que se originaron en la presente elaboración de la investigación y que no se incluyen como parte final de la presente
- Capítulo IX: referencias. Se presenta las referencias utilizadas en la presente investigación.
- Capítulo X. anexos. Se adjunta información que complementa a la investigación.

1.1 Descripción y formulación del problema

La explotación de metales como Pb, Zn, Cu, Ag, Au y otros, de alguna forma implican la generación de sustancias tóxicas propias del mismo proceso de extracción y procesamiento posterior del mineral, dentro de ellos tenemos la presencia de drenajes de mina, relaves y desmontes como los más significativos. Los drenajes por lo general tienen características ácidas con presencia de metales pesados y pH ácido, de la misma forma los desmontes al quedar expuestos al ambiente entran en contacto con el agua de las precipitaciones y el oxígeno atmosférico generándose nuevamente drenajes ácidos de mina, así mismo los relaves mineros que resultan del procesamiento del mineral contienen gran cantidad de metales pesados, teniendo como destino final las relaveras. Dada la complejidad de las diversas sustancias y/o

compuestos tóxicos que se generan e impactan en el ambiente de forma negativa alterando los diversos ecosistemas terrestres como la flora, fauna, recursos hídricos, el suelo y el hombre, es necesario desarrollar y aplicar técnicas que permitan la remoción de estas sustancias. La Unidad Minera (UM) Catalina Huanca desarrolla actividades extractivas desde hace mucho tiempo atrás generando algunas sustancias como iones metálicos y sales con niveles de pH que alcanzan valores entre 2 y 2.5 aproximadamente, presentando una alta solubilidad y existiendo la posibilidad de infiltrarse hacia las aguas subterráneas o escurriendo hacia las aguas superficiales. Los tratamientos para la remoción de este tipo de contaminantes se han basado principalmente en procesos físico-químicos, sin embargo, no se ha llegado a alcanzar los niveles esperados, motivo por el cual es necesario recurrir a tratamientos avanzados como la ultrafiltración y ósmosis inversa para tal fin. En tal sentido formulamos:

¿Será posible alcanzar una alta remoción de iones metálicos y salinidad mediante procesos avanzados de ultrafiltración y ósmosis inversa?

1.1.1 Problema General

¿Cómo se podrá aplicar una remoción de Iones disueltos en efluentes mineros por procesos combinados de ultrafiltración y ósmosis inversa en la unidad minera Catalina Huanca?

1.1.2 Problemas específicos

- ¿Cuál será la concentración de iones disueltos del efluente de mina a la salida de la etapa de pretratamiento e inicio del proceso por ósmosis inversa de la unidad minera Catalina Huanca?
- ¿Cuál será el pH óptimo del efluente de mina a escala piloto de manera que se alcance la máxima remoción de iones disueltos generados en la unidad minera Catalina Huanca?

- ¿Cuál será la eficiencia del proceso de ósmosis inversa en la remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la unidad minera Catalina Huanca?

1.2 Antecedentes

1.2.1 Antecedentes internacionales

Vera et al. (2018), en su trabajo de investigación titulada *Tecnologías de biosorción y membranas en la eliminación de metales pesados*.

Realizó la comparación entre la tecnología de membrana y biosorción en la eliminación de Pb^{+2} y Cd^{+2} de las aguas residuales de la industria minera. Se utilizó la celda de membranas SEPA CF II a escala laboratorio, que permite realizar operaciones de filtración en flujo cruzado con las membranas comerciales de ósmosis inversa (SE, GE Osmonics) y de nanofiltración (DK, GE Osmonics), obteniéndose un coeficiente de rechazo con la de ósmosis de 98.77 para el Pb^{+2} y 98.30 para el Cd^{+2} ; y con la de nanofiltración 98.67 para el Pb^{+2} y 98.05 para el Cd^{+2} . Con la tecnología de biosorción utilizando en el bagazo de caña de azúcar se obtuvieron porcentajes de remoción de 97.76 para el Pb^{+2} y 81.35 para el Cd^{+2} . Desde el punto de vista ambiental, las dos tecnologías son compatibles con el ambiente, y desde la perspectiva económica, las membranas cuentan con un costo inicial mayor que el proceso de biosorción, pero su vida útil es de cerca de 10 años. En la biosorción se pueden aprovechar residuales agrícolas con un bajo costo de adquisición.

Caviedes et al. (2015), en su artículo de investigación, *Tratamiento para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales*.

Presenta una revisión de algunas características toxicológicas de metales pesados, sus fuentes industriales, los niveles permisivos de vertimiento y 20 diferentes técnicas subdivididas en convencionales y no convencionales empleadas para la remoción de. Una de las razones son los cambios en la especiación del As (V) de monovalente a

divalente a medida que aumenta el pH, ya que los iones divalentes se eliminan a una velocidad mucho más alta en comparación con los iones monovalentes debido a los radios hidratados más grandes de los divalentes. As (V) se retiene mejor porque es mayor en tamaño y carga y las membranas suelen estar cargadas negativamente. La presencia de As (III) es el factor más importante asociado a la eficiencia en la eliminación de arsénico en las aguas subterráneas por su menor tamaño y la neutralidad de su especie. El ensuciamiento y desgaste de las membranas es uno de los costes más a tener en cuenta a la hora de optar por una tecnología de membrana. En cuanto al pH de trabajo, se obtienen altos rendimientos en la eliminación de arsénico para pH alcalino en torno a 10. Sin embargo, en la gran mayoría los resultados ya son buenos (por encima del 80%) para un pH neutro. La temperatura de trabajo para estas tecnologías es la establecida en condiciones normales. El rango entre 20-25 °C es la temperatura aplicada en los diversos estudios, no variando los resultados con aumento de ésta. Esto supone un ahorro energético. La ultrafiltración junto con la microfiltración son procesos de baja presión donde se retiene únicamente arsénico vinculado a partículas sólidas, pero el consumo energético es mucho menor. La elección de una presión u otra dependerá de la naturaleza del contaminante a eliminar metales pesados en medios hídricos, así como las condiciones fisicoquímicas en las que estos tratamientos han presentado mejores eficiencias de remoción. La ultrafiltración es un proceso de fraccionamiento selectivo utilizando presiones de hasta 145 psi (10 bares). La ultrafiltración se utiliza ampliamente en el fraccionamiento de leche y suero, y en fraccionamiento proteico. Concentra sólidos en suspensión y solutos de peso molecular mayor a 1000 uma. El permeado contiene solutos orgánicos de bajo peso molecular y sales (Alka, et al; 2012). La regulación ambiental referente a vigilancia y control de los vertimientos industriales ha presentado un fortalecimiento evolutivo en los últimos años y ha evidenciado un

notable incremento en los controles sobre los metales pesados; todo esto, debido al grado de peligrosidad de estos residuos y a su desbordado aumento y persistencia en las fuentes hídricas. El amplio espectro de tratamientos con diversos componentes y modificaciones que han sido estudiados para evaluar su eficiencia en la remoción de los metales pesados, también evidencia la preocupación de las autoridades y de la comunidad científica por presentar soluciones a esta problemática; actualmente se ha desarrollado un elevado número de técnicas y de nuevos materiales con eficiencias prometedoras en procesos de absorción y adsorción, todas con el marcado objetivo de reducir costos energéticos y operacionales, que permitan su implementación y sostenibilidad.

Arce (2013), en su investigación *Opciones tecnológicas para la eliminación de arsénico dentro del proceso de potabilización del agua: revisión bibliográfica y análisis bibliométrico*.

Establece una clara diferenciación cuando nos referimos al hecho de “eliminar arsénico” ya que el comportamiento de las dos especies principales (el arsénico trivalente y el arsénico pentavalente) es muy diferente. El primero de ellos es mucho más complicado de eliminar que el segundo como se ha demostrado en la gran mayoría de los artículos seleccionados. Además, el arseniato As (V) se adsorbe mejor que el arsenito de As (III), ya que el As (V) está presente en forma aniónica (H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-}), mientras que As (III) está presente como H_3AsO_3 (carga neutra). La presencia de As (III) en las aguas a tratar se cifra en un 25-50% del arsénico total en esa agua. Por tanto, la problemática es más que real y se pone de manifiesto en casi todos los artículos, tratando el fenómeno del pretratamiento para la oxidación de As (III) a As (V) como un elemento fundamental del proceso de eliminación de arsénico de las aguas de consumo. El pretratamiento de oxidación no puede ser muy agresivo

pues esto repercutiría en el desgaste de las membranas y por tanto su pérdida de eficacia. Algunos artículos plantean la oxidación del As (III) de manera biológica con microorganismos que forman parte de la propia agua a transformar, esta opción respeta al medio ambiente y su coste es ínfimo.

Varón (2019), en su investigación *Análisis de tecnologías compactas para el tratamiento de aguas residuales no doméstica en empresas con poca disponibilidad de espacio*, analiza los resultados obtenidos se concluye que para la remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) las tecnologías se comportaron la siguiente manera:

Ósmosis > ultrafiltración = electrocoagulación > oxidación > intercambio > DAF. Al analizar la remoción de sólidos totales de las tecnologías fue que: Electrocoagulación > ósmosis = ultrafiltración > oxidación > DAF > intercambio. Los resultados obtenidos para remoción de grasas y aceites se muestran a continuación de mayor a menor remoción: Ósmosis = DAF > ultrafiltración > electrocoagulación > intercambio > oxidación. Después de analizar los valores obtenidos podemos concluir que, para la remoción de hidrocarburos, las tecnologías se comportan de la siguiente manera: Ósmosis > ultrafiltración = electrocoagulación = DAF > oxidación > intercambio. Los resultados obtenidos para remoción de turbiedad se muestran a continuación de mayor a menor remoción: Ósmosis = ultrafiltración = electrocoagulación > oxidación > intercambio > DAF. Realizados los análisis de las áreas necesarias para la instalación de las tecnologías los resultados fueron los siguientes y se muestran de mayor área a menor área requerida: DAF > electrocoagulación > ultrafiltración > ósmosis > oxidación. Los costos de instalación de las diferentes tecnologías se muestran a continuación de mayor a menor costo de instalación y puesta en marcha:

Ósmosis > ultrafiltración > DAF > electrocoagulación > oxidación. La tecnología más recomendada para las empresas del sector metalmeccánico según la evaluación de las

tecnologías es la ultrafiltración esto debido a que cuenta con una alta remoción de contaminantes porcentajes superiores al 90%, pero a su vez es más económica que la ósmosis inversa, por lo que está más al alcance del presupuesto que se destina para la instalación y puesta en marcha de la planta de tratamiento.

Lara (2002), en su investigación *Eliminación de nutrientes mediante procesos de membrana*.

Analizó los rendimientos obtenidos en la reducción de nutrientes de un agua residual doméstica sometida a una depuración biológica convencional, seguida de una filtración por membranas ayudada con una microcoagulación previa; se utilizaron membranas de fibra hueca de microfiltración de 0.45 mm y de ultrafiltración de 10.000 Daltons. Se encontraron relaciones entre la eliminación de fósforo y la dosis de sulfato de alúmina utilizada, y se involucró el efecto sobre esta relación que tiene la concentración de entrada. En el caso de la ultrafiltración las eficiencias están entre el 9% y cerca del 80% también hablando de fósforo total. Como se puede ver en estos resultados el potencial es muy grande permitiéndonos prácticamente producir un agua con una cantidad de fósforo a medida del uso que se le quiera dar. La ultrafiltración obtiene mayores eficiencias que la microfiltración para una misma dosis de coagulante, no obstante, se deberá tener en cuenta que requiere también un mayor consumo eléctrico para producir la misma cantidad de agua por lo que se tendrá que evaluar cuál es la técnica más adecuada en cada caso, sin olvidar las limitaciones que implica la microfiltración. (ver Figura 69 y Figura 70). Desde el punto de vista económico también es importante resaltar que la cantidad de sulfato de alúmina consumida es inferior al teórico obtenido por estequiometría. Utilizando microfiltración, de los 18 cultivos y 23 variedades consideradas, en 9 de ellas el aporte de fósforo sería superior al requerido por el cultivo en caso de que se regara exclusivamente con agua residual regenerada, en otros 2 la

aportación de fósforo es similar a las necesidades, y en los restantes 12 se requeriría aporte adicional de fósforo. Algo similar ocurre cuando se utiliza ultrafiltración, para 12 variedades el fósforo aportado sería superior al necesario, y en los 11 restantes se necesitaría más fósforo, como aportación complementaria.

Camarillo (2005), en su trabajo de investigación titulada *Separación selectiva de metales pesados en efluentes industriales mediante tecnología PSU*.

Arriba entre sus principales conclusiones obtenidas en la realización y modelización de los experimentos PSU en el modo semicontinuo han sido: Se ha demostrado la viabilidad técnica de un proceso PSU en modo semicontinuo para la retención de iones cadmio (II) y plomo (II) presentes en una disolución acuosa, utilizando ácido poliacrílico como polímero soluble en agua. Durante la etapa de retención, se obtienen corrientes permeado que cumplen las concentraciones de vertido directo impuestas por la legislación ($< 0,5 \text{ mg/l}$). Las condiciones seleccionadas fueron: $\text{pH} = 5$, concentración de polímero = 0,1% en peso, fuerza iónica = 0,15 M en NaNO_3 , presión transmembranal = 4 bar, temperatura = 50 °C, velocidad tangencial = 2 m/s y razón de carga = 25 mg metal/g PAA.

Es viable regenerar casi en su totalidad el polímero utilizado en la etapa de retención, mediante acidificación de la corriente obtenida anteriormente y aplicando un nuevo proceso de ultrafiltración. En esta etapa el pH de operación seleccionado fue de 3, siendo el resto de condiciones idénticas a las de la etapa anterior. En el caso de mezclas de cadmio (II) y plomo (II) no es posible una separación selectiva de ambos metales utilizando ácido poliacrílico, consiguiéndose tan sólo el enriquecimiento en uno de los metales de las diferentes corrientes del proceso. Esta circunstancia es debida a que la diferencia en las constantes globales de formación de los complejos PAA-Cd y PAA-Pb no es lo suficientemente grande (los logaritmos de β_{102} son 5,7 y 6,3,

respectivamente). La principal diferencia observada entre los experimentos con un único metal y los realizados con mezclas binarias es el descenso en los coeficientes de rechazo para el cadmio en presencia de plomo. Este hecho se puede explicar dada la menor afinidad del cadmio por el PAA, que le desfavorece en su competencia con el plomo por los grupos funcionales del polímero. Se ha elaborado y validado un modelo que permite simular las diferentes etapas de las que consta este proceso (con uno o dos metales), pudiéndose reproducir las evoluciones de las concentraciones de metales en las diferentes corrientes y los valores de determinados parámetros de diseño. La etapa de regeneración del polímero es, en todos los casos, la que determina el área de membrana requerida, puesto que en ella se dan los menores flujos de permeado.

Ayala et al. (2006), en su investigación *Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23*.

Comprobaron la excelente eficiencia de la membrana NF90SR en la remoción del colorante amarillo ácido 23 contenido en las aguas residuales industriales. La remoción promedio del colorante fue superior al 97%. La capacidad de eliminación de sal lograda con el proceso de diafiltración fue significativa, alcanzando una capacidad de enriquecimiento de colorante hasta del 83.34%. En general, de todas las condiciones analizadas de pH y temperatura no se observó un cambio significativo en la capacidad de retención y purificación del colorante, siendo la capacidad de retención disminuida en el experimento a 37 °C, explicado esto por el incremento de la solubilidad del colorante, la cual permitía un paso mayor del colorante por la membrana. Esta condición favorecía el paso de los cloruros permitiendo una purificación más rápida, lo cual redundaría en un menor uso de agua de diafiltración. Si el proceso de diafiltración se realizara por más tiempo y por tanto con más volumen de agua de diafiltración, la capacidad de eliminación de la sal podría ser mayor del 99%, pero se incrementarían

los costos operacionales de purificación del efluente. La tecnología de membranas de nanofiltración es una herramienta tecnológica adecuada en el tratamiento de las aguas cargadas con colorantes hidrosolubles, pues la capacidad de retención del colorante por las membranas de NF90SR fue superior a 98,0%, la cual se debe contemplar tanto como un tratamiento de aguas residuales, como parte constitutiva del ciclo productivo por su potencial de recuperación de materiales de valor significativo. Se comprobó que las impurezas, colorantes subsidiarios y materia primas que no reaccionaron en el colorante residual, se concentran con la membrana NF90SR, pues estas tienen pesos moleculares similares al del colorante objetivo del proceso. La presencia de esta clase de impurezas requiere la necesidad de la optimización de las etapas de síntesis del colorante, con el fin de obtener mayor pureza del colorante. En el proceso de retención y purificación del colorante amarillo ácido 23, empleando la diafiltración se observó también la concentración de colorantes subsidiarios. Respecto a la presión de filtración de 200 psig limitada por la bomba empleada, se observa un buen desempeño, tanto en capacidad de retención del colorante, como en la relación alcanzada del flujo entre alimentación y permeado. La velocidad de flujo cruzado es fundamental para mantener las condiciones de la membrana en buen estado durante el proceso de filtración. En general, se debe lograr que el caudal de flujo cruzado sea lo más alto posible para generar un incremento en el flujo de permeado, presentando un efecto de optimización del proceso en tiempo y calidad de purificación de la solución. El material polimérico tipo TFC de la membrana NF90SR presentó un excelente desempeño en la retención del colorante hidrosoluble amarillo ácido 23 y en el paso de sales por la diafiltración.

1.2.2 *Antecedentes Nacionales*

Rimarachin y Huaranga (2015), en su investigación sobre *Tratamiento de aguas de efluentes minero–metalúrgicos utilizando, métodos pasivos y activos en sistemas experimentales*.

Manifiestan que los relaves mineros son la principal fuente de contaminación debido a la presencia de metales pesados, que repercuten en el sistema ecológico y en la salud humana; de allí que el objetivo fue tratar las aguas de efluentes mineros-metalúrgicos aplicando métodos activos y pasivos. Para el método pasivo se utilizó compost y humus y como material de reacción se usó la técnica de flujo estable propuesta por Smit (1999), mientras que para el método activo se utilizó membrana semipermeable artesanal y se siguió la técnica de la ósmosis inversa. El análisis cuantitativo de los metales pesados Cu, Zn, As, Pb, Cd y Hg, se realizó utilizando el espectrofotómetro Perkin Elmer 601. Por el sistema compost y humus encontramos remoción de Cu, As, Cd y Hg superiores al 97%, Zn para el humus con 85.67% y Pb para compost con 95.66%. En el sistema de membrana semipermeable artesanales, Pb, As y Zn fueron retenidos en niveles superiores al 99 % y otros como el Hg y Cd fueron retenidos totalmente; en este caso el metal con menor capacidad de retención fue el Cu con valores de 98.83% para la membrana del humus y 99.55 % para la membrana del compost. Se concluye que el humus y compost tienen una elevada capacidad de remoción de metales; y al juntarlo con la membrana semipermeable, maximiza aún más los resultados esperados.

Vargas (2017), en su trabajo de investigación titulada *Eficiencia de la membrana de nanofiltración para obtener salmuera a partir de aguas residuales de regeneración de resinas de intercambio iónico en el distrito de Carabayllo – 2017*.

Desarrolla en su etapa inicial un tratamiento previo al agua de regeneración de resinas de intercambio iónico, para determinar la concentración de iones presentes y sales en

general presentes en el agua, así como el pH, turbidez, color, sabor y más. La determinación se realizó mediante un análisis cuantitativo de agua, donde se consideró los siguientes parámetros: determinación organoléptica, fisicoquímica, compuestos ionizados, determinación volumétrica de cloruros y dureza total del agua. Los resultados obtenidos para cuatro muestras consideradas al inicio y final del proceso fueron los siguientes: La prueba 1 (agua residual sin tratamiento) trabajada a 80 PSI de presión, con una conductividad de 50 mS y 8200 mg/L de dureza total, obtuvo como resultado un permeado (agua tratada por nanofiltración) con una conductividad de 12 mS y una dureza total de 120 mg/L. La prueba 2 (agua residual sin tratamiento) trabajada a 120 PSI de presión, con una conductividad de 50 mS y 8320 mg/L de dureza total, obtuvo como resultado un permeado (agua tratada por nanofiltración) con una conductividad de 9 mS y una dureza total de 92 mg/L. La prueba 3 (agua residual sin tratamiento) trabajada a 80 PSI de presión, con una conductividad de 70 mS y 8220 mg/l de dureza total, obtuvo como resultado un permeado (agua tratada por nanofiltración) con una conductividad de 14 mS y una dureza total de 144 mg/l. La prueba 4 (agua residual sin tratamiento) trabajada a 120 PSI de presión, con una conductividad de 70 mS y 8452 mg/L de dureza total, obtuvo como resultado un permeado (agua tratada por nanofiltración) con una conductividad de 16 mS y una dureza total de 136 mg/L.

Lezcano y Rosales (2013), en su tesis *Efecto de la variación del porcentaje de recuperación sobre el contenido de Sílice en el permeado y rechazo RO*.

Estudia el efecto que causa la variación del porcentaje de recuperación sobre el contenido de sílice en el permeado (producto) y en el rechazo (subproducto) de ósmosis inversa (OI). Las variables de estudio sobre la variación del porcentaje de recuperación son: el contenido de sílice en el permeado y el contenido de sílice en el rechazo de OI.

Se determinó que el incremento del porcentaje de recuperación en 69.00%, reduce hasta en un 23% el contenido de sílice en el permeado de OI. Este incremento permite obtener un permeado con un contenido de sílice de hasta 0.194 mg/L ó 0.194 ppm, concentración favorable respecto a la que se obtiene con recuperaciones inferiores, ya que se acerca al rango establecido para tal fin (0 – 0.02 ppm de sílice). Además, se logra establecer que este incremento eleva la conductividad de permeado de 15.11 - 16.40 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respecto al valor requerido para su ingreso a la caldera (0 – 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Por lo tanto, es favorable trabajar a una razón de 69%.

Rivera y Diaz (2018), en su investigación *Efecto del flujo volumétrico y variación de presión sobre el porcentaje de sílice en el permeado durante el proceso de ósmosis inversa de agua de pozo de la empresa AGROLMOS. S.A.*

Muestran los valores de conductividad obtenidos por las combinaciones de los cuatro flujos de alimentación y 4 presiones de operación. El valor más alto es 13.27 y el más bajo 7.7033 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para 40 psi y 44 m³/hr, y 55 psi y 35 m³/hr de caída de presión y de flujo de alimentación, respectivamente. Estos valores representan una disminución en conductividad respecto a la alimentación de agua (1315 $\mu\text{S}/\text{cm}$) de 98,99% y 99,41%, en el orden dado. En relación a los niveles de sílice en los permeados, mostrados, para la mayoría de combinaciones de flujo y presión están dentro del rango aceptable para agua de alimentación a calderas que operan a presiones de 800 psig. El valor promedio para el agua de alimentación para calderas de 800 psig es 0,9 ppm (Gamma Química de Venezuela, C.A. y Dow, 2016). Para un flujo de 44 m³/hr y una caída de presión de 40 psi, el contenido de sílice obtenido es 0.9533 ppm de SiO₂, y es el único valor no aceptable. Para la calidad de agua esperada por la empresa Agrolmos, el resto de combinaciones de flujo de alimentación y caída de presión, los contenidos de sílice son aceptables. Teniendo en cuenta que una mayor caída de presión significa un mayor

consumo de energía en la operación del sistema de ósmosis inversa, y que es de interés para la empresa obtener el mayor flujo, se recomendaría operar con 38 m³/hr y una caída de presión de 45 psi, con lo cual se obtiene un contenido de sílice de 0.22 ppm, un valor que asegura una operación limpia de la caldera de la empresa.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Remover los iones disueltos presentes en los efluentes mineros mediante procesos combinados de ultrafiltración y ósmosis inversa en la unidad minera Catalina Huanca.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Determinar las concentraciones de iones disueltos del efluente de mina a la salida del proceso de tratamiento e ingreso a la etapa de ósmosis inversa 1 y 2 de la unidad minera Catalina Huanca.
- Determinar el pH óptimo del efluente de mina a escala piloto a fin de alcanzar la máxima remoción de iones disueltos generados en la unidad minera Catalina Huanca.
- Estimar la eficiencia obtenida por procesos de ósmosis inversa en la remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la unidad minera Catalina Huanca.

1.4 Justificación

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales pueden ser tratados por diversos métodos fisicoquímicos, los cuales alcanzan eficiencias bastante aceptables para descargar a los cuerpos receptores en cumplimiento con los LMP y estándares de calidad ambiental, sin embargo dichos efluentes tratados siempre contienen una cantidad de carga contaminante que hace imposible su rehúso para otras actividades propias de la UM, los cuales pueden estar compuestos por presencia de metales pesados y cierto grado de salinidad. En tal sentido, se hace necesario contar con un tratamiento que permita una remoción de contaminantes que alcancen la máxima eficiencia posible a fin de evitar impactar en los

diferentes ecosistemas terrestres, acuáticos o de flora y fauna. Como parte de la política ambiental de la UM Catalina Huanca, su compromiso está en asegurar el cuidado del medio ambiente, minimizando al máximo la generación de sustancias contaminantes que puedan impactar de forma negativa alterando la calidad ambiental, dentro de sus procesos se plantea reducir lo máximo posible la presencia de metales pesados y salinidad, utilizando como tratamientos avanzados de mayor eficiencia los procesos combinados de ultrafiltración y ósmosis inversa, mediante los cuales se pretende alcanzar niveles o eficiencias cercanas al 99%, haciendo posible que la calidad del agua pueda ser utilizado para el uso interno, procesamiento industrial, riego de áreas verdes, etc. En este sentido, el presente estudio se justifica en la necesidad de reducir significativamente los niveles de metales pesados y salinidad con la aplicación de tecnologías avanzadas en el tratamiento de aguas residuales industriales mineras, asegurando de esta forma el cuidado del ambiente al no realizarse vertimientos a los cuerpos receptores que puedan ocasionar problemas aguas abajo. Con el cuidado y estrategias adecuadas, la protección en todos los medios naturales cada vez ira recobrando mucha más fuerza hasta alcanzar el cambio de un lugar habitable para todos los seres vivos y por un tiempo ilimitado, tomando conciencia que esa es la clave a mejorar por parte de todos los que conforman cualquier tipo de hábitat.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

Mediante un proceso combinado de ultrafiltración y ósmosis inversa se alcanzará la máxima remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la unidad minera Catalina Huanca.

1.5.2 Hipótesis específicas

- Las concentraciones de iones disueltos se encuentran en niveles elevados en los efluentes generados a la salida del pretratamiento en la unidad minera Catalina Huanca.
- El nivel de pH óptimo a escala piloto se encuentra entre 7.5 y 8.5 para poder alcanzar la máxima remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la unidad Catalina Huanca.
- Los procesos de ósmosis inversa tienen una alta eficiencia en la remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la unidad minera Catalina Huanca.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1 *Remoción de iones*

Los procesos de remoción de iones consisten en una separación física de los solutos presentes en el agua residual al pasar a través de una membrana selectiva a cierto tipo de iones, dichos procesos pueden ser: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, diálisis y electrodiálisis; los cuales se diferencian gracias al material que constituye la membrana, la naturaleza de la fuerza impulsora, el mecanismo de separación y el tamaño de poro de la membrana (Izquierdo, 2010).

La adsorción se refiere a la capacidad de ciertos materiales sólidos que tienen la capacidad de remover iones metálicos, moléculas, gases, compuestos orgánicos, etc., en su superficie a través de uniones físicas o químicas. El material sólido donde queda retenida la sustancia se conoce como adsorbente y el material adsorbido se denomina adsorbato. Dadas las características de este proceso, la adsorción es empleada en el tratamiento de aguas contaminadas con la finalidad de remover algunos iones, moléculas, compuestos o especies disueltas en solución, ya que también es considerada como un método efectivo y económico para el tratamiento de efluentes que contienen metales tóxicos (Soledad, 2020.).

2.1.2 *Efluentes mineros*

En los diferentes procesos mineros se generan grandes cantidades de residuos de diversa composición y origen, estos son: desde material particulado, los que se producen durante labores de explotación; efluentes líquidos, generados mediante procesos mineros (los lavaderos, escombreras), hasta los residuos sólidos los cuales se acumulan en las escombreras, así mismo también se producen gases los cuales son liberados durante procesos mineros y metalúrgicos. Estos diferentes tipos de residuos ocasionan grandes problemas ambientales (Gamarra, 2015).

Los efluentes de origen minero se caracterizan por presentar una gran concentración de metales pesados (iones metálicos disueltos suspendidos) como: Hg, Cr, Pb, Fe, etc dentro de su composición, alterando sus características fisicoquímicas, ocasionando que estas aguas sean completamente peligrosas para la salud de personas y el medio ambiente. Los efluentes mineros se originan en diferentes etapas a la que es sometido el mineral para obtener estos metales presentes de una forma más concentrada. Estos efluentes dependen de las operaciones unitarias utilizadas en la extracción, en la concentración y en los procesos empleados en la refinación para luego ser comercializados. En el caso de la minería polimetálica, en la etapa de Extracción se generan los drenajes de minas y soluciones gastadas, principalmente cuando se utilizan procesos hidrometalúrgicos, lixiviación in situ, en pila, extracción por solvente, etc. Se prefiere reciclar el agua, sino es posible, se neutraliza y/o desintoxica antes de disponerlas en tanques para su evaporación o reutilización. En la etapa de Concentración se emplea el proceso de flotación selectiva, donde a partir de un mineral que contiene entre un 1% a 2% en Cobre, se obtiene un concentrado con un 32% de mineral. El agua del proceso, se emplea para transportar los sólidos o ganga hasta su punto de disposición final, tanque de Relave, donde se evapora el agua y se vuelve a bombear al proceso. Y en la etapa de refinación, los procesos de electrólisis generan barros anódicos. En las fundiciones se produce un efluente ácido, debido al lavado y enfriamiento de gases antes de que ingrese el gas a las plantas de ácido. Es así que en las actividades mineras se utilizan grandes cantidades de recurso hídrico provocando un gran impacto ambiental (Contreras y Gutiérrez, 2015).

Efluentes líquidos. Los efluentes líquidos mineros se producen a partir de la manipulación de diversos productos mineros con agua y soluciones químicas, a ello le debemos agregar la interacción con la naturaleza, es decir las reacciones que se originan entre los productos mineros y las aguas superficiales o de lluvia; lo cual da lugar a infiltraciones, procesos de oxidación, hidrólisis, lavado, entre otros (Gamarra, 2015).

Aguas ácidas. Las aguas ácidas de minería son resultado de la oxidación de minerales sulfurados, piritita, en presencia de aire, agua y bacterias. La piritita es un elemento sulfuroso, común y abundante; y por lo general se encuentra en los desechos mineros, su oxidación genera ácido sulfúrico y óxidos de hierro. Las aguas ácidas atacan diversos minerales, ocasionando soluciones que generan elementos tóxicos al ambiente, como Cd o As. La producción de aguas ácidas puede darse mediante la exploración, operación o cierre de mina, estas aguas pueden llegar de 3 fuentes principales: sistemas de desagüe de minas, tanques de lavado y desmontes. Siendo estas descargas las que ocasionan desde daños como decoloración local de suelos y drenajes con precipitación de óxidos de Fe, o pueden generar una gran contaminación de sistemas de ríos y tierras de cultivo.

Mientras que en el ambiente los excesos de metales pesados se pueden producir por los drenajes de aguas de minas, desmontes o lavados mineros. Existen metales como el Cd y el Hg, y no metales como Sb y As, que son comunes en mínimas cantidades en depósitos metálicos, pero son altamente tóxicos, aun en pequeñas concentraciones, generalmente es su forma soluble, la cual puede ser absorbida por seres vivos. De la misma manera sucede con el Pb, a diferencia que este metal es muy poco reactivo a menos que sea ingerido y la mayoría de los minerales naturales de plomo son muy insolubles en aguas subterráneas. La interacción entre los minerales y el agua puede ocasionar diversas reacciones, según sea la naturaleza del mineral implicado y de la físico-química del agua involucrada. En función a la mineralogía, cada mineral posee diferentes comportamientos con el agua: hay solubles e insolubles, hidrolizables y no hidrolizables, sorbentes y no sorbentes.

Los minerales solubles pueden estar en diversos grados, y depender de la temperatura del agua. Así tenemos como ejemplo: La halita y el yeso (minerales solubles en distinto grado). La halita es bastante soluble incluso en agua fría, a diferencia del yeso, que es menos soluble,

aunque su solubilidad incrementa considerablemente con un aumento de temperatura (Gamarra, 2015).

La hidrólisis de los minerales se basa en la descomposición producida por la acción de los hidrogeniones de las aguas ácidas. Este proceso consta de 3 pasos:

- 1) Rotura de la estructura del mineral. Debido a su pequeño tamaño y gran movilidad, los iones H^+ se introducen fácilmente en las redes cristalinas, lo que ocasiona la pérdida de su neutralidad eléctrica; para recuperarla, el cristal tiende a expulsar a los cationes, cuya carga es también positiva. Como consecuencia, la estructura cristalina colapsa, y se liberan también los aniones.
- 2) Lixiviado de una parte de los iones liberados, que son transportados por las aguas fuera de la roca meteorizada.
- 3) Neoformación de otros minerales, con la unión de los iones que dan como resultado compuestos insolubles. La intensidad del proceso hidrolítico se traduce en el grado de lixiviación de elementos químicos y en la formación de nuevos minerales (Gamarra, 2015).

El responsable de la generación de las aguas ácidas es el proceso de oxidación de la pirita, que se favorece en áreas mineras gracias a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros (mediante las labores mineras de acceso y por los poros que presentan las pilas de estériles y residuos) así como el aumento en la superficie de contacto de las partículas. Es así que los factores que más afectan a la generación ácida son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución espacial de la pirita (Gamarra, 2015).

La gran problemática que presenta la formación de aguas ácidas ha buscado desarrollar y establecer una serie de ensayos (estáticos, cinéticos y modelos matemáticos) que sean capaces de determinar el potencial generador de acidez de los residuos mineros. Teniendo así que los ensayos estáticos predicen la calidad de los drenajes comparando la capacidad de

neutralización y el potencial de generación ácida; Los ensayos cinéticos consisten en reproducir en laboratorio los procesos y las condiciones de los lugares de mina que pueden generar acidez, brindando información sobre el nivel de producción ácida. Estos ensayos cinéticos ayudan a confirmar los resultados de los ensayos estáticos, pero necesitan de mayor tiempo y son más costosos que éstos. Finalmente, la modelización matemática nos permite conocer la calidad de las aguas y la generación de los drenajes ácidos, mediante la simulación de periodos largos de tiempo de todas las variables y condiciones que afectan a la formación de aguas ácidas.

Para manejar las aguas ácidas se necesita entender el ciclo de los elementos entre sulfuros y óxidos para interferir en la movilidad de los elementos, en el momento indicado para controlar el sistema en la medida necesaria. Cada residuo minero es un paciente único debido a la gran variabilidad de los parámetros que controlan el sistema (tipo de yacimiento, granulometría, clima, proceso metalúrgico, entre otros) (Gamarra, 2015).

Relaves. La lixiviación consiste en la sensibilidad de los minerales oxidados para ser atacados por soluciones ácidas, para lo cual se emplea agua (o una solución de ácido y agua) para disolver y extraer el compuesto metálico deseado y separarlo de los materiales estériles. Por ejemplo, en las minas de oro se emplean soluciones de cianuro y agua, mientras que en las minas de cobre se emplean soluciones de ácido sulfúrico. Dichas soluciones (lixiviantes) pueden regarse sobre montones gigantes de mena rota (lixiviación en pilas, o en ramas), sobre mena triturada almacenada en tinajas gigantes (lixiviación en tinajas), o, en el caso de minas de cobre de baja ley, sobre pilas de material estéril o relaves (lixiviación de desechos) para la recuperación de pequeñas cantidades de cobre. Bajo las pilas de material a lixiviar primero se instala una membrana impermeable, sobre la que se dispone un sistema de drenaje (tuberías perforadas) que permiten recoger las soluciones que se infiltran a través del material. Mediante el sistema de riego por goteo y de los aspersores, se vierte lentamente una solución de ácido con agua en la superficie de las pilas, esta solución se infiltra en la pila hasta su base, actuando

rápidamente; la solución disuelve el mineral deseado presente en los minerales oxidados, formando una solución, que es recogida por el sistema de drenaje, y llevada fuera del sector de las pilas en canaletas impermeabilizadas (Gamarra, 2015).

La lixiviación o riego de pilas se mantiene de 45 a 60 días, que es el tiempo en que debería de agotarse completamente la cantidad de mineral lixiviable. Mientras que el material restante, llamado ripio, se transporta a través de correas a botaderos, donde se da lugar a un segundo proceso de lixiviación para la extracción del resto del mineral. Para las operaciones de procesamiento del mineral se necesitan grandes volúmenes de agua que, a pesar de que pueda ser reciclada, se necesita desechar una cierta cantidad. Por otro lado, estas aguas contienen productos químicos y niveles de metales. En así que, en algunas minas, el agua es previamente tratada para extraerle estos contaminantes antes de ser reutilizada o desechada, pero no en todas.

Sin contar con el destino final que se le dé al agua, por lo general son almacenadas de manera temporal en tanques para lograr que las partículas sólidas se hundan o puedan ser tratadas, y de esta forma extraer los componentes tóxicos; mediante la filtración o evaporación, gran cantidad de agua de estos tanques terminará en el medio ambiente; lo cual depende de la efectividad del diseño y construcción del tanque, factores climáticos, propiedades del suelo, y proximidad de ríos y arroyos.

En el proceso de minería, las rocas extraídas que contienen metales pesados (cadmio, cobre, plomo, manganeso, mercurio, plata y zinc) se almacenan en rumas o canchas de relave, exponiéndolas al oxígeno y al agua. A pesar que las concentraciones de productos químicos, metales y ácidos, no son elevadas para ser un problema ambiental o para dañar los organismos vivos, si éstos no se tratan eficientemente, pueden ocasionar daños y contaminar las fuentes de agua. Es así que la problemática más grande asociado con el procesamiento de la mina es la manera de cómo desechar los relaves resultantes del tratamiento. El alto contenido de agua en

los relaves, y la creación de partículas finas que no se solidifican rápidamente, aumentan la inestabilidad y la vulnerabilidad de los relaves a la erosión (Gamarra, 2015).

2.1.3 Filtración de líquidos

La filtración es un proceso mediante el cual se pasa una mezcla o suspensión sólido-líquido mediante un medio poroso, el cual retiene los sólidos y deja pasar los líquidos. Este procedimiento puede ser superficial (en torta, o sobre soporte), cuando la materia en suspensión que se va a separar tiene un diámetro superior al de los poros, y se retiene en la superficie del filtro; y en volumen (profundidad o lecho filtrante), cuando la materia en suspensión es de diámetro inferior al de los poros, quedando retenida en el interior de la masa porosa. Para la filtración sobre soporte delgado se emplean mallas, tamices, membranas; Sobre soporte grueso, filtros en material aglomerado o cartuchos; Y sobre soporte con precava, filtros de bujías, bastidores y tambores. Para realizarla en profundidad se emplean medios granulares, conocidos como lechos filtrantes. La filtración mediante lechos filtrantes se emplea cuando hay gran cantidad de material a eliminar y el tamaño de las partículas contenidas en el agua es pequeño, especialmente, para separar partículas y microorganismos que no se eliminaron en los procesos de coagulación y sedimentación, después el trabajo que los filtros realizan está en función a la eficiencia de los procesos preparatorios. (Trejo, 2008)

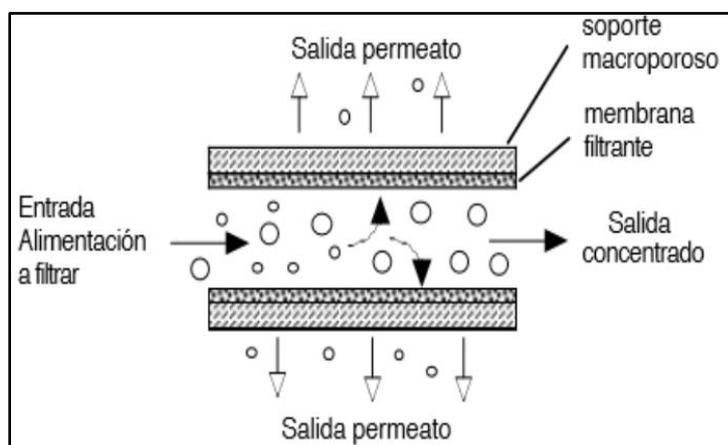
La filtración tiene como objetivo: la Remoción de material suspendido (medido como turbiedad), compuesto de flóculo, suelo, metales oxidados y microorganismos, la Remoción de microorganismos, ya que muchos de ellos son extremadamente resistentes a la desinfección; y la Remoción de turbiedad para impedir la interferencia de la turbiedad con la desinfección (Trejo, 2008).

La asociación entre membranas y filtración permitió desarrollar técnicas de filtración de líquidos, aquí trataremos técnicas en las cuales la transferencia de materia se produce bajo el efecto de un gradiente de presión; se trata de la Microfiltración, de la Ultrafiltración, de la

Nanofiltración y de la ósmosis inversa. La microfiltración y la ósmosis inversa fueron las primeras técnicas desarrolladas a nivel industrial con membranas artificiales. La ultrafiltración y luego la nanofiltración se desarrollaron gracias a los adelantos recientes en la fabricación de nuevas membranas. Estas cuatro técnicas se desarrollan como filtración tangencial, es decir, cuando el líquido a filtrar circula de manera permanente y con cierta velocidad a lo largo de la superficie de la membrana (Ver Figura 1). La velocidad de circulación es por lo tanto, junto con la presión a través de la membrana, uno de los dos parámetros importantes en la operación de una planta de filtración por membrana (Guizard, 1999).

Figura 1

Principio de la filtración tangencial (en tubo).



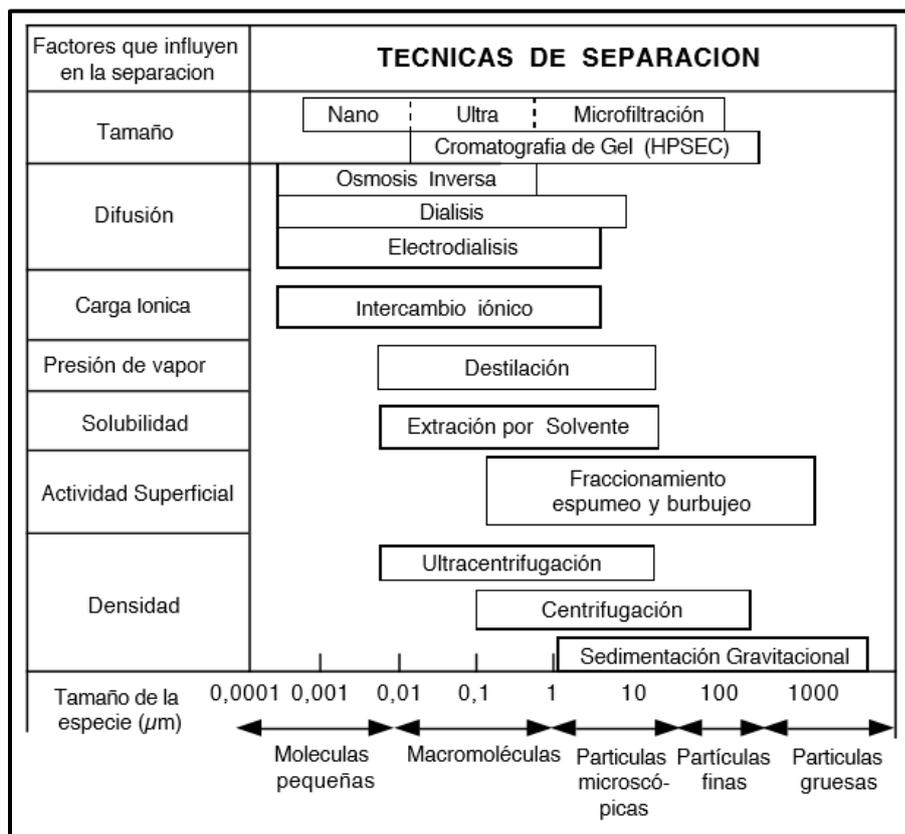
Nota. Cortesía de Guizard, 1999.

La filtración tangencial evita la acumulación de materia (torta en la superficie de la membrana) y juega un papel importante en microfiltración o ultrafiltración que en nanofiltración u ósmosis inversa. Eso está relacionado con la naturaleza de las especies separadas y con la estructura de la membrana utilizada en cada técnica. El objetivo principal de estas técnicas de filtración de líquido es la separación de especies en función al tamaño, pudiendo estas especies estar en suspensión, o en solución en el líquido a tratar (Guizard, 1999).

En la Figura 2, se observa que las diferentes técnicas cubren cada una un campo particular, y corresponden cada una a especies clasificadas en función de su tamaño o de su masa molecular.

Figura 2

Clasificación de las técnicas de separación en base al tamaño de las especies a filtrar y a factores operacionales



Nota. Cortesía de Guizard, 1999.

La separación de partículas se obtiene por filtración frontal, mientras que las técnicas de filtración tangencial que utilizan membranas artificiales empiezan con la separación de partículas microscópicas o de especies biológicas tales como las bacterias, en cuyo caso se trata de microfiltración. Para fragmentos de materias más pequeñas como los coloides, macromoléculas o virus, se trata de la ultrafiltración; y para las pequeñas moléculas de masa molecular inferior a 1000 se separan por una técnica llamada nanofiltración, técnica que permite también separar iones multivalentes de iones monovalentes. Mientras que la ósmosis

inversa es la última técnica que detiene casi completamente las especies contenidas en un líquido. Se utiliza principalmente en un medio acuoso para obtener agua ultra pura (Guizard, 1999).

2.1.4 Filtración por membranas

La función de la membrana es la separación de dos fases y actúa como una barrera selectiva al transporte de materia. En estos procedimientos se emplean propiedades de semipermeabilidad de ciertas membranas, las cuales son permeables al agua y a ciertos solutos, e impermeables a otros y a las partículas. Se utilizan como continuación de los procesos clásicos de filtración, es decir, luego de la filtración simple, como la filtración en profundidad, en la que quedan retenidas las partículas de mayor diámetro, se aplican operaciones como microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración u ósmosis inversa. En la operación de membrana una corriente de alimentación se divide en dos: por un lado, el permeado que contiene el material pasado a través de la membrana y por otro, el retenido o concentrado que contiene las especies que no atraviesan la membrana.

Las operaciones de membranas se emplean para concentrar o purificar una solución o una suspensión (solvente – soluto o separación de partículas) y para fraccionar una mezcla (separación de soluto – soluto). Las ventajas de estas operaciones son: la separación se puede realizar a temperatura ambiente sin cambio de fase, sin acumulación de productos dentro de la membrana, no requiere la adición de productos químicos, con lo cual se disminuyen los residuos contaminantes, las tecnologías de membrana son muy eficientes en la retención de microorganismos, logrando efluentes de excelente calidad microbiológica (Trejo, 2008).

Microfiltración (MF). La microfiltración es un proceso de flujo de baja presión, a través de membrana para la separación de coloides y partículas suspendidas en el rango de 0.05 – 10 micrones. La microfiltración puede utilizarse a cualquier escala (recientemente en fermentaciones, clarificación y recuperación de biomasa, etc.), presentando importantes

ventajas, tanto en costo como en calidad del filtrado, cuando se compara con otras técnicas convencionales de separación, como la generación y producción de líquidos altamente puros. La microfiltración, se utiliza para eliminar turbidez, bacterias y protozoos de aguas residuales, ya sea totalmente o de manera significativa (Trejo, 2008).

Ultrafiltración. Es un proceso de membranas empleado para la eliminación de partículas (clarificar) y desinfección del agua. A diferencia de la ósmosis inversa y la Nanofiltración, la ultrafiltración respeta la composición química del agua, eliminando contaminantes de hasta $0,01 \mu$. Estas membranas son porosas y eliminan quistes, bacterias, virus, sólidos en suspensión y partículas de Fe y Mn, pero estas membranas no resultan eficientes en la eliminación de compuestos orgánicos naturales o sintéticos. El proceso de ultrafiltración es parecido a la coagulación y la filtración de arena, en puesto que se usa como pretratamiento para las aguas potables; ya que la ultrafiltración no retiene los solutos de bajo peso molecular, la contrapresión osmótica es inapreciable y las presiones de funcionamiento son entre 0,15-4,5 bares (Trejo, 2008).

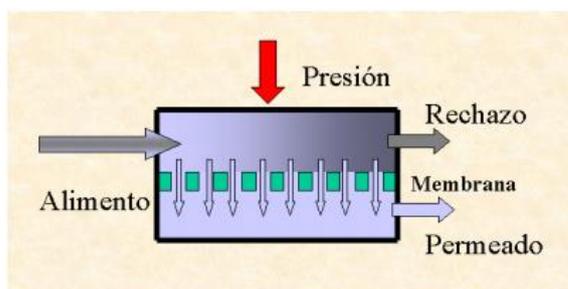
La ultrafiltración es un tipo de filtración mediante membranas, en la cual la presión hidrostática fuerza un líquido contra una membrana semipermeable. Los sólidos suspendidos y los solutos de alto peso molecular son retenidos, mientras que el agua y los solutos de bajo peso molecular atraviesan la membrana. Este proceso de separación es utilizado para purificar y concentrar soluciones macromoleculares. La ultrafiltración se empela en casos de flujo cruzado o flujo sin salida. Las membranas usadas en la ultrafiltración tienen poros más grandes que las usadas en la nanofiltración y la ósmosis inversa y es por lo tanto la menos costosa de los tres, es útil para la separación de materiales delicados puesto que es un método que no desnaturaliza en la separación (Gamarra, 2015).

La ultrafiltración es una operación de separación que presenta características de una filtración "normal" y del ósmosis inversa. El modelo más empelado es el de poros en vez del

de solubilidad-difusión, se utiliza en la separación de productos bioquímicos (proteínas, polisacáridos) y metales complejos. El agua a tratar para por un sistema de baja presión, donde membranas de gran resistencia la reciben para liberarla de materiales de alto peso molecular y sólidos suspendidos. Los fluidos viajan por la superficie de las membranas en forma horizontal a una gran velocidad impidiendo la formación de lodos que obstaculicen y resten eficiencia de las mismas. Los procesos de ultrafiltración remueven por encima del 90% de los contaminantes, lo que significa reducir costos de disposición o reciclado de un 10%, necesita un mínimo de energía para su funcionamiento y poca atención del operador. Son de capacidad variable, ya que van de 50 a 180 000 galones por día (Gamarra, 2015).

Figura 3

Esquema del Proceso de Ultrafiltración

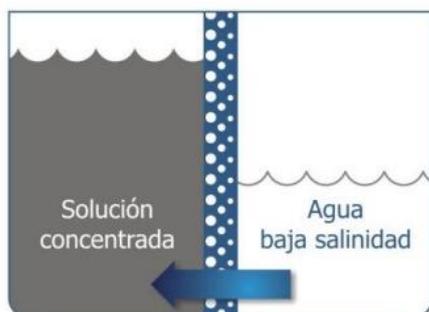


Nota. Cortesía de Gamarra, 2015.

La nanofiltración. Proceso denominado también como ósmosis inversa a baja presión o desendurecimiento por membranas; donde se relaciona la osmosis y la ultrafiltración en términos de selectividad de la membrana, la cual está diseñada para eliminar iones polivalentes (calcio y magnesio) en operaciones de ablandamiento. La Nanofiltración se ha empelado en la eliminación o separación de materia orgánica; así como también en la desmineralización, remoción de color y desalinización. En esta técnica los iones monovalentes son rechazados débilmente por la membrana, lo cual explica por qué la nanofiltración permite una

contrapresión osmótica mucho menor que la ósmosis inversa, es así que la presión de trabajo de la nanofiltración varía entre 0.5 a 1.5 MPa. La Nanofiltración elimina contaminantes de hasta 0,001 μ de tamaño, esto implica bacterias, virus, materia orgánica, sales, dureza, patógenos, pesticidas, turbidez, pesticidas y casi todos los contaminantes conocidos, funcionando a presiones entre 5-10 bares con un rendimiento de hasta 90% (Trejo, 2008).

2.4.4 Ósmosis inversa. La ósmosis es un fenómeno, relacionado con el movimiento de un solvente mediante una membrana semipermeable. La ósmosis del agua es un fenómeno biológico importante para el metabolismo celular de los seres vivos. En el caso del ósmosis, el solvente pasa espontáneamente de una solución menos concentrada a otra más concentrada, a través de una membrana semipermeable, en ambas soluciones hay una diferencia de energía, originada en la diferencia de concentraciones. El solvente pasa en el sentido indicado hasta alcanzar el equilibrio. Si se agrega a la solución más concentrada, energía en forma de presión, el flujo de solvente se detendrá cuando la presión aplicada sea igual a la presión osmótica aparente entre las dos soluciones.

Figura 4*Esquema del Principio de Ósmosis*

Nota. Cortesía de Gamarra, 2015.

La presión osmótica aparente es una medida de la diferencia de energía potencial entre ambas soluciones. Si se aplica una presión mayor a la solución más concentrada, el solvente comenzará a fluir en el sentido inverso. Se trata del ósmosis inversa. El flujo de solvente es una función de la presión aplicada, de la presión osmótica aparente y del área de la membrana presurizada. En la ósmosis inversa se puede decir que se hace lo contrario del ósmosis. Hay que tener presente que en la ósmosis inversa a través de la membrana semipermeable sólo pasa agua. Es decir, el agua de la zona de alta concentración pasa a la de baja concentración.

Figura 5*Esquema del Principio de Ósmosis Inversa*

Nota: Cortesía de Gamarra, 2015.

La ósmosis inversa, es un proceso de control de la filtración y difusión utilizado para aguas salobres y de mar, en la cual por medio de presión el solvente de una disolución se transfiere a través de una densa membrana, fabricada expresamente para retener sales y solutos de bajo peso molecular; Es decir, la ósmosis inversa es un proceso en el cual se fuerza al agua a pasar a través de una membrana semipermeable, desde una solución más concentrada a una solución menos concentrada, mediante la aplicación de presión (Trejo, 2008).

Aplicación de la ósmosis inversa. Se han desarrollado diversas experiencias para concentrar y purificar líquidos y gases, La ósmosis inversa puede aplicarse en:

- **Desalinización de aguas salobres** La salinidad de estas aguas es de 2000 mg/l – 10 000 mg/l. Para su tratamiento se necesitan presiones de 14 a 21 bares para conseguir coeficientes de rechazo superiores al 90 % y así alcanzar aguas con concentraciones salinas menores de 500 mg/l, que son los valores recomendados por la OMS como condición de potabilidad. Las plantas de tratamiento utilizan módulos de membranas enrolladas en espiral.
- **Desalinización de agua de mar** Según sea la zona geográfica, la salinidad de estas aguas es de 30 000 mg/l a 40 000 mg/l. Para alcanzar condiciones de potabilidad se emplean membranas de poliamida de tipo fibra hueca que permiten obtener coeficientes de rechazo superiores al 99,3 % con presiones de trabajo de 50-70 bar.
- **Producción de agua ultrapura** La ósmosis inversa permite obtener a partir del agua de consumo (concentración de sólidos disueltos < 200 mg/l) agua de la calidad exigida en la industria electrónica. El principal problema en este tipo de instalaciones es el bioensuciamiento de las membranas, por lo que es necesaria la instalación de sistemas de esterilización mediante radiación UV.
- **Tratamiento de aguas residuales** En este caso la ósmosis inversa está limitada por los elevados costos de operación debido a los problemas de ensuciamiento de las

membranas. Para aguas residuales industriales, la ósmosis inversa se emplea en industrias donde es posible mejorar la economía del proceso mediante la recuperación de componentes valiosos que puedan volver a reciclarse en el proceso de producción: industrias de galvanoplastia y de pintura de estructuras metálicas, o donde la reutilización del agua tratada signifique una reducción importante del consumo de agua: industria textil. Para las aguas urbanas, la ósmosis inversa es un tratamiento que estaría indicado como tratamiento terciario, siendo posible obtener agua con una calidad que la hiciera apta para el consumo (Gamarra, 2015).

2.2 Marco conceptual:

2.2.1 Remoción

Proveniente del verbo Remover, que alude a quitar o sacar algo de su lugar, independientemente de que sea reemplazado o no por otro. En algunos casos la remoción puede ser simple mientras que en otros puede necesitar mucho tiempo (Contreras y Gutiérrez, 2015).

2.2.2 Coagulación

Proceso de Desestabilización de las partículas suspendidas mediante la adición de un producto químico, lo que provoca la neutralización de la carga de los coloides presentes en el agua y por lo tanto, la disminución de las fuerzas que mantienen separadas las partículas (Apaza, 2015).

2.2.3 Floculación

Proceso químico mediante el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras formando coágulos mayores denominados flocs; en este proceso los flocs aumentan su peso específico hasta superar el del líquido que los contiene, lo cual permite la sedimentación del aglomerado (Apaza, 2015).

2.2.4 Operación de membranas

Es una operación donde una corriente de alimentación está dividida en dos: un permeado conteniendo el material que ha pasado a través de la membrana y rechazo o concentrado conteniendo las especies que no la atraviesan. Estas operaciones pueden utilizarse para concentrar o purificar una solución o suspensión, o para fraccionar una mezcla (Trejo, 2008).

2.2.5 Aguas residuales industriales

Son Aguas generadas como consecuencia del desarrollo de un proceso productivo, que incluye las provenientes de la actividad minera, agrícola, pesquera, agroindustrial, entre otras (Echegaray, 2018).

2.2.6 Aguas de mina

Son aquellas Aguas producidas por los trabajos ejecutados en el interior de una mina, y se encuentran en contacto con cuerpos mineralizados adquiriendo características que hacen necesario su tratamiento previo para su disposición final, consideradas como aguas residuales (Echegaray, 2018).

2.2.7 Contaminación

Es la introducción de sustancias en un medio que hacen que este sea inseguro o no apto para su uso. El medio puede ser un ecosistema, un medio físico o un ser vivo; mientras que el contaminante puede ser una sustancia química. Es siempre una alteración negativa del estado natural del medio, y por lo general, se genera como consecuencia de la actividad humana considerándose una forma de impacto ambiental (Contreras y Gutiérrez, 2015).

2.2.8 Contaminación del agua

Es la introducción en el agua de cualquier sustancia no deseable, que no se encuentra normalmente en el agua, que hacen el agua inadecuada para el uso previsto (Echegaray, 2018).

Procesos de tratamiento de agua Catalina Huanca

PTAM UFRO (precipitación química).

Objetivo. Pre-tratar o acondicionar el agua alimentada al sistema de membranas

Descripción de proceso. Químicos usados:

- Sulfato férrico: Agente coagulante adicionado en 1era etapa de proceso (cámara de coagulación).
- Hidróxido de calcio: Agente precipitante adicionado posterior a aplicación de agente de coagulación.
- Floculante: Coadyuvante de coagulación aplicador para mejorar la sedimentación, adicionado después de la aplicación del agente precipitante, antes de la unidad de sedimentación.

Descripción. PTAM UFRO, se ha destinado para pre-tratar el agua de alta conductividad específica procedente de interior mina para posterior tratamiento por desalación a través del sistema UFRO y Evaporación MVR. PTAM UFRO Consta de las siguientes unidades de proceso:

Reactor flujo pistón (RFP). El reactor de flujo pistón está dividido en las siguientes etapas. La primera cámara donde se realiza la reacción de coagulación con un volumen de 47 m³. La segunda cámara donde se realiza la reacción de neutralización tiene un volumen de 20 m³. Finalmente, a la salida de esta cámara de neutralización, se realiza la reacción de floculación a través de un canal de aproximadamente 100 m, a través del cual se transporta el material floculado hacia la unidad de sedimentación.

La reacción de coagulación por aplicación con sulfato férrico (pH: 6.1 – 6.3), se realiza a máxima agitación mediante la inyección de aire a lo largo de superficie transversal de la cámara de coagulación. Posteriormente los coágulos formados, pasan a la cámara neutralización, donde se aplica una solución de hidróxido de calcio con la finalidad de

incrementar el pH de la solución a valores en el rango: 8.0- 8.2, con el fin de conseguir precipitación de hidróxido férrico.

Finalmente, después del proceso de neutralización con hidróxido de calcio, el proceso de precipitación química se acelera por aplicación de un coadyuvante de coagulación (floculante), con el propósito de aglomerar los coágulos formados, y con mayor peso pasen a ser recolectados en forma de lodos en las unidades de sedimentación.

Figura 3

Reactor flujo pistón



Nota. Imagen tomada de planta.

Sedimentador. El agua pre-tratada químicamente, es conducida por una canaleta de concreto y se deposita en las unidades de sedimentación con una capacidad total de 100 m³, constituido por 02 unidades sedimentadores de 50 m³ cada uno, los cuales tienen la opción de trabajar independientemente. Estos tanques permiten decantar los lodos generados por el proceso descrito en el punto anterior, permitiendo tener un efluente clarificado que posteriormente es bombeado a tanques de almacenamiento para posterior tratamiento en el sistema UFRO. Los lodos generados en el proceso son dispuestos en la presa de relaves.

Cabe mencionar en este punto, que el efluente clarificado tiene la opción alternativa de enviar el agua procesada a post-tratamiento a través de un sistema de decantación – macro filtración, clarificación de lamelas – macrofiltración.

Figura 4*Unidad de sedimentación*

Nota. Imagen tomada de planta.

Ósmosis inversa (UFRO).

Objetivo. Desalar el agua pre-tratada procedente de la etapa de precipitación química.

Descripción de proceso: Químicos usados:

- **Ácido nítrico:** Químico aplicado antes del sistema ultrafiltración para control de potencial de incrustación en el sistema de membranas y en la etapa de post-tratamiento para neutralización de agua producto antes de su descarga. También usado como agente de limpieza química del sistema de ultrafiltración.
- **Hipoclorito de sodio:** Químico usado como agente oxidante y de limpieza química del sistema de ultrafiltración.
- **Hidróxido de sodio:** Químico aplicado al ingreso del segundo paso RO con el objetivo de reducción de niveles de boro en agua tratada. También aplicado como agente de limpieza del sistema de ultrafiltración.
- **Bisulfito de sodio:** Químico usado para el control de agentes oxidantes hacia el sistema de membranas y como agente biostático. Usado como preservante del sistema de membranas durante periodos de fuera de servicio de la planta.

- Anti incrustante. Químico aplicado al ingreso del 1er y 2do paso RO, con la finalidad de control el potencial de incrustación de sales escasamente solubles sobre el sistema de membranas.
- Limpiadores membranas: Químico ácido y alcalino usado en la limpieza química del sistema de membranas de ósmosis inversa.

Descripción. UFRO, se ha destinado para tratar el agua de alta conductividad específica procedente de la etapa de precipitación química, unidad diseñada remoción de iones disueltos presentes en el agua. Consta de las siguientes unidades de proceso: macro filtración, ultrafiltración, y ósmosis inversa.

Macro filtración. El sistema de macro filtración tiene como finalidad remover materia particulada y suspendida con tamaño de partícula superior a 150 u. Este sistema usa la tecnología de filtros de disco auto limpiantes y está formado por 8 porta filtros dispuestos en arreglos de 4 unidades, los cuales trabajan en paralelo como etapa previa al sistema al sistema de ultrafiltración.

Figura 5

Especificaciones de filtros disco

Equipo	Tipo	Paso (micras)	Caudal (m ³ /h)
Filtro protección UF	Anillos	150	58
Filtro protección UF	Anillos	150	58

Nota. Datos obtenidos de planta.

Figura 6

Unidad de macrofiltración



Nota. Imagen tomada de planta.

Ultrafiltración. Tiene por finalidad tratar el agua macro filtrada y pre-tratar el agua suministrada al sistema de ósmosis inversa. Esta unidad permite remover partículas en el orden de 0.03 μ , entre estas: materia coloidal y suspendida, material floculado, materia orgánica, microorganismos, etc.

Este sistema está compuesto por 20 vasos de ultrafiltración, dispuestos en un arreglo de 10 vasos los cuales trabajan en paralelo. El diseño de esta unidad contempla el uso de flujo directo.

La unidad de ultrafiltración se diseñó para un caudal máximo de 54 m^3/h , y está compuesta por los siguientes equipos:

Alimentación a ultrafiltración. Sistema compuesto por dos bombas centrifugas que aspiran agua del tanque de 5.0 m^3 y lo envían al sistema de ultrafiltración.

Depósitos de almacenamiento de agua ultra filtrada. Dos depósitos de almacenamiento de agua ultra filtrada de capacidad 10 m^3 receptiona el permeado de los dos módulos de ultrafiltración.

Sistema de bombeo de retro lavado. Sistema compuesto por dos bombas de agua ultra filtrada para la realización de limpiezas (retro lavados).

Modulo A de la ultrafiltración. Sistema compuesto por 10 vasos de presión.

Modulo B de la ultrafiltración. Sistema compuesto por 10 vasos de presión. Las dosificaciones necesarias en la ultrafiltración se realizan a través de los siguientes skids:

Dosificación de ácido nítrico. Usado para reducir el potencial de incrustación en el sistema de membranas, limpieza química de la ultrafiltración, y neutralización del agua producto.

Dosificación de hipoclorito de sodio. Usado como agente oxidante y en el lavado químico de la ultrafiltración.

Dosificación de soda caustica. Usado como agente alcalinizante al ingreso del 2do paso de ósmosis inversa y en el lavado químico de la ultrafiltración.

Dosificación de bisulfito de sodio. Usado como agente de control de oxidantes y preservante del sistema de membranas.

El sistema de ultrafiltración está configurado para realizar limpiezas químicas cortas mediante operaciones llamadas CEB (limpieza química mejorada) y limpiezas largas CIP (Limpieza en el lugar), la cuales están en función de la TMP y normalización de data.

Figura 7

Especificaciones de módulo membrana de UF

Descripción	Tipo	Proveedor	Modelo Carcasa	Peso Lleno (Kg)	Volumen (l)	Area Membrana (m2)
Modulo de Ultrafiltración DFP	Industrial	DOW	SFP-2880XP	135	39	77

Nota. Datos obtenidos de planta.

Figura 8

Especificaciones técnicas de módulo membrana de UF

Parámetro	Unidades SI
Flux de filtrado	40 – 110 L/m ² h
Rango de flux por módulo	2.0 – 8.5 m ³ /h
Temperatura	1 – 40 °C
Máxima presión de ingreso a módulo	6.25 Bar
Máxima operación TMP	2.1 Bar
pH operación	2 - 11
Máximo NaOCl	2,000 mg/L
Máximo tamaño de partícula	300 um
Configuración de flujo	Exterior interior, flujo directo
Turbidez esperada	<= 0.1 NTU

Nota. Datos obtenidos de planta.

Figura 9

Unidad de macro filtración



Nota. Imagen tomada de planta.

Ósmosis inversa. Tiene por finalidad tratar el agua ultra filtrada y está diseñada para remover iones disueltos en el agua. Este sistema está formado por 2 pasos, el primer pasó por 12 vasos de presión, y un segundo paso por 4 vasos de presión, cada vaso de presión contiene 06 elementos membrana.

Primer paso RO 1. El agua ultra filtrada almacenada en los depósitos de ultrafiltración es bombeada mediante dos bombas centrifugas hasta la primera etapa de tratamiento de

ósmosis inversa. Previo a los filtros existentes a la salida de estas bombas, se dosifica bisulfito de sodio y anti incrustante para protección del sistema de membranas.

El agua ultra filtrada alimentada al 1er paso RO 1 produce dos corrientes: permeado RO 1 y concentrado RO 1. Parte del concentrado es recirculado a la entrada del ósmosis con el fin de lograr conversiones mayores y con ello rendimientos superiores y otra parte se envía para concentración en el evaporador. El permeado se almacena en un tanque de capacidad máxima de 10.0 m³

El primer paso de ósmosis inversa está diseñado para tratar un caudal máximo de 54 m³/h de agua ultra filtrada con una recuperación del 50%. Este primer paso está compuesto por los siguientes skid modulares.

Alimentación a RO 1. Sistema de bombeo compuesto por tres bombas centrífugas en configuración 2+1R que aspiran el agua ultra filtrada y la bombean al tren de ósmosis RO 1.

Bombeo de alta presión. Cuatro bombas de pistón en configuración 3+1R recepciona el agua alimentada por las bombas centrífugas y presurizan el sistema hasta los valores determinados con el fin de permear a través de las membranas de la ósmosis RO 1.

Recirculación RO 1. Sistema de recirculación del concentrado de la ósmosis, compuesto por dos bombas en configuración 1+1R que aumentan la presión perdida en los trenes de la ósmosis.

Tren RO 1. Módulo de ósmosis para el tratamiento de la corriente de agua ultra filtrada con un caudal máximo de 54 m³/h. El módulo está compuesto por 12 tubos de presión con membranas de ósmosis y 6 tubos de presión sin membranas que funcionan como acumuladores.

Tanque de permeado de RO 1. Depósito de almacenamiento del agua osmotizada de la ósmosis RO 1 con una capacidad máxima de 10 m³.

Recirculación a tanque de permeado RO 1. Una bomba de recirculación mueve constantemente el agua osmotizada del tanque de almacenamiento para su ajuste de pH.

Las dosificaciones necesarias para la adecuación del agua de entrada se realizan a través de los siguientes Skids complementarios:

Dosificación de anti incrustante. Previene la incrustación del sistema de membranas.

Dosificación de bisulfito de sodio. Actúa como secuestrante de cloro y biostático.

Dosificación de soda caustica. Ajustar su pH a los parámetros deseados para reducción de niveles de boro.

Estos sistemas realizan enjuague con agua permeado según programación o cuando el sistema sale de servicio.

Cada determinado tiempo se realizan limpiezas químicas de la ósmosis inversa mediante operaciones CIP (Limpieza en el lugar), la cuales están en función de la evaluación de la normalización de data.

Figura 10

Especificaciones de módulo membrana de RO 1- RO 2

Descripción	Tipo	Proveedor	Port Vessel Modelo	Membranas			Presión (psi)	Puerto salida PERMEDADO
				Uds	Marca	Modelo		
Port Vessels	Industrial	BEL	BEL8-S(2x1,5")-1500-6M	6	DOW	SW30HRLE-370/34i	1,500	1,5 NPT macho

Nota. Datos obtenidos de planta.

Figura 11

Especificaciones técnicas de módulo membrana de RO 1- RO 2

Parámetros	Unidades
Máxima temperatura de operación	45 °C
Máxima presión de operación	83 Bar
Máxima caída de presión	1 Bar
Rango de pH, operación continua	2 - 11
Rango de pH limpiezas cortas	1 - 13
Máximo SDI	5
Tolerancia al cloro libre	< 0.1 ppm

Nota. Datos obtenidos de planta.

Figura 12

Unidad de ósmosis inversa



Segundo paso RO 2. Este sistema recibe el agua permeado del ósmosis 1, la cual es ajustada en pH y luego bombeada hacia la ósmosis 2. Previo a los filtros existente a la salida de las bombas, se dosifica anti incrustante para garantizar la protección de las membranas.

El agua es osmotizada en el tren RO 2, saliendo de los módulos dos corrientes: permeado del RO 2 y concentrado de RO 2. Parte del concentrado es recirculado a la entrada de la ósmosis con el fin de lograr conversiones de ósmosis mayores y con ello rendimientos superiores.

El permeado resultante de la ósmosis es el agua final de tratamiento en toda la instalación y es almacenada en un tanque de capacidad máxima de 50 m³.

El segundo paso de la ósmosis está compuesto por los siguientes skids modulares:

Alimentación a OI 2. Sistema de bombeo compuesto por dos bombas centrifugas que aspiran el agua permeada de la RO 1 y la bombean a través del tren RO 2.

Bombeo de alta presión y trenes OI 2.

Dos bombas centrifugas receptionan el agua alimentada por las bombas de alimentación y presurizan el sistema hasta valores determinados con el fin de permear a través de las membranas de la ósmosis.

Tanque de agua tratada. Depósito de almacenamiento de agua permeada en la ósmosis con una capacidad máxima de 50 m³.

Las dosificaciones necesarias para la adecuación del agua de entrada se realizan a través de los skids siguientes:

- Dosificación de ácido nítrico. Tiene como finalidad la adecuación de pH del agua tratada.
- Dosificación de anti incrustante. Tiene como finalidad prevenir el potencial de incrustación sobre las membranas.

Evaporación compresión mecánica de vapor (MVR).

Objetivo. Tratar el concentrado del 1er paso de la ósmosis inversa.

Descripción de proceso. Químicos usados.

- Sulfato de calcio: Químico usado como semilla para prevenir incrustación en superficie calórica de intercambiadores de calor.
- Carbonato sodio: Usado en limpieza química de superficie calórica.
- Ácido nítrico: Usado en limpieza química de superficie calórica.
- Antiincrustante: Aplicado al agua de caldero para control de la incrustación.

- Secuestrante de oxígeno: Aplicado al agua de caldero para control de la corrosión.

Descripción. Evaporación MVR, tiene como finalidad tratar el concentrado del 1er paso RO 1 y generar dos corrientes: condensado y sal. Diseñado con capacidad de tratamiento de 7.0 – 9.0 L/s.

El proceso de evapo-cristalización está integrado por 4 evaporadores tipo circulación forzada con su respectivo separador. El automatismo Controlador lógico programable (PLC) permite pasar fácilmente de un proceso de operación de 4 evaporadores a un sistema a 3 evaporadores a través de un sistema de by pass. El último evaporador sirve de cristizador. Cuando el cuarto esta fuera de servicio (en proceso de limpieza química), el tercero sirve de cristizador. La cristalización se da a una temperatura determinada que sobrepasa el límite de solubilidad de la sal. Cuando el agua llega al último separador, libera el excedente de energía (“flash”). En los 3 primeros separadores no se alcanza el límite de solubilidad de sal, y no ocurre cristalización. La densidad en salida del cristizador es un parámetro importante, el cual permite poner en marcha una bomba, para transportar la solución sobresaturada hacia la centrifuga.

El vapor vivo generado por la caldera es trasladado al interior del lavador de vapor, para mezclarse con el vapor de los separadores. Estos últimos son enviados al sistema de compresores, para recomprimirse con la finalidad de incrementar la presión y con esto la temperatura del agua que circula dentro de los 4 evaporadores.

Figura 13

Unidad de evaporación MVR



La unidad MVR consta de las siguientes unidades de proceso:

- Caldera: Caldera piro tubular que permite de inyectar vapor vivo a 4 bar absoluto. Un regulador de presión permite de reducir la presión de vapor vivo, de 4 bar absoluto, a una presión de servicio de la instalación de 0.5 bar absoluto.
- Tanques de almacenamiento: Dos tanques de 60 m³. Útiles en caso de problemas durante la OI para continuar el tratamiento del agua salada. Dos agitadores instalados en los tanques para evitar una posible sedimentación.
- Tanque de agua limpia: Un tanque de agua limpia de 60 m³, para los ciclos de lavado.
- Tanques CIP: Dos tanques de limpieza en sitio CIP de 60 m³, uno para HNO₃ y el otro para Na₂CO₃.
- Intercambiador de calor: El cual tiene como función recuperar la energía del condensado, de esta forma el condensado se enfriará y al mismo tiempo, el agua de alimentación (concentrado RO 1) ganará calor como etapa previa de ingreso al sistema de evaporación. Para este proceso se usan intercambiadores de calor de placas, conformadas por 02 unidades instaladas en paralelo, uno de los cuales está en servicio, mientras el otro en limpieza.

- Evaporador: Concentra el agua hasta saturación, a través del proceso de circulación forzada. El evaporador de circulación forzada comprende un intercambiador de calor, un separador, y una bomba de circulación.

El agua se envía al intercambiador de calor donde se precalienta y luego se envía al separador. Después del proceso de evaporación, la porción de líquido es bombeada nuevamente para reenvió al intercambiador.

El sistema de evaporación consta de cuatro evaporadores a circulación forzada con sus respectivos separadores, bombas axiales y bombas de transferencia del agua salada entre 2 efectos.

- Cristalizador: El agua saturada del evaporador es luego enviada al cristalizador, cumple también la función de evaporador para recuperar agua, por lo general lo conforma el último efecto de la unidad de evaporación.
- Re-compresión mecánica de vapor: Con la finalidad de ahorrar energía, este sistema usa re compresión mecánica de vapor. El vapor del evaporador se comprime para incrementar la temperatura, y reusarlo para continuar la evaporación.

Los compresores instalados son tipos ventiladores centrífugos.

El sistema está conformado por tres compresores mecánicos de vapor con la finalidad de re comprimir los vapores del proceso procedente del lavador de vapor y separadores. Los vapores recuperados de los 4 separadores a 82 °C, se envían a limpiador de vapor y luego, estos últimos se envían a los compresores logrando temperaturas 92.8 – 99 °C. Las temperaturas de vapor re comprimido por los compresores dependen de la programación de velocidades de estos.

- Condensador: Extracción de no condensables.

El vapor extraído de la unidad tiene que condensarse. Esta unidad usa un condensador mixto. Este sistema usa una torre de enfriamiento. El condensador y la torre de enfriamiento trabajan en circuito cerrado.

- Bomba de vacío: Para tener un control perfecto de la presión en la unidad, durante el arranque se tiene bombas de vacío.
- Separación del cristal. (centrifuga): El lodo extraído del cristizador tiene aproximadamente 20% de cristales. Para separar el agua de los cristales, el equipo cuenta con una centrifuga. Con esta se recupera el 90 % de los cristales. Este sistema tiene un tornillo transportador de los cristales para su transporte final.

El licor madre del lodo se recicla al tanque de alimentación del cristizador.

PTAM LAMELLAR (precipitación química).

Objetivo. Tratar las aguas de baja conductividad específica procedente de interior mina.

Descripción de proceso. Químicos usados:

- Sulfato férrico: Agente coagulante adicionado en 1era etapa de proceso (cámara de coagulación).
- Hidróxido de calcio: Agente precipitante adicionado posterior a aplicación de agente de coagulación.
- Floculante: Coadyuvante de coagulación aplicador para mejorar la sedimentación, adicionado después de la aplicación del agente precipitante, antes de la unidad de sedimentación.

Descripción. PTAM LAMELLAR, se ha destinado para tratar las aguas de baja conductividad específica procedente de interior mina. Diseñado con capacidad de 15.0 L/s. El afluente procedente de interior mina ingresa a la cámara de alimentación conformada por tres cámaras con agitación, la 1era cámara corresponde al compartimiento de aplicación de sulfato férrico, la 2da cámara corresponde a la aplicación de hidróxido de calcio, y la tercera cámara a la aplicación de floculante. Posteriormente el agua fluye hacia la zona de decantación, donde podemos diferenciar 3 partes (fondo):

- zona de espesado y almacenaje.
- zona de separación con lamelas.
- zona de agua limpia.

Figura 15**PTAM LAMELLAR**

Nota. Imagen tomada de planta

Los sólidos separados en la zona de lamelas se deslizan por las superficies inclinadas y decantan. El agua limpia rebosa por los canales de recogida.

El lodo decantado se retira por un desfogue inferior, siempre que haya suficiente fango. El lodo al igual que PTAM UFRO es dispuesto en presa de relaves.

El agua tratada procedente del PTAM LAMELLAR, es enviado con fines de pulimento a otra unidad de tratamiento conformada por 8 decantadores verticales (BV – 15). Cada decantador está integrado a 02 unidades de macro filtración mono capa (arena) de 2.0 m³ de capacidad cada uno.

Al mismo tiempo este sistema cuenta con otro clarificador de lamelas usado como stand by, o según requerimiento de capacidad de tratamiento, o mantenimiento de unidades. Esta unidad tiene una capacidad de tratamiento de 25 L/s y un volumen total de 47 m³.

Figura 16

Clarificador LAMELAR



Nota. Imagen tomada de planta

Figura 17

Unidad de decantación macro filtrac



Nota. Imagen tomada de planta

Estas últimas unidades de decantación – macro filtración y clarificador de lamelas stand by también están enlazados a PTAM UFRO, cuando el sistema UFRO se encuentra fuera de servicio.

2.2.9 Caracterización del agua residual industrial

La Tabla 1, muestra la caracterización del agua residual industrial que sale de mina e ingresa a la Planta de Tratamiento de Agua de Mina (PTAM). Las concentraciones corresponden a los promedios de los años 2016, 2017 y 2018.

Tabla 1

Concentraciones fisicoquímicas en ARI

Muestra	pH	TDS	C.E. (uS/cm)	Cl- (mg/L)	SO4= (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Dureza (CaCO ₃) (mg/l)
Promedio	7.9	14 868	24 821	5 593	475.8	2 557	836

Nota. Tabla de datos tomados de planta

Tabla 2

Concentraciones (mg/L) de metales pesados en ARI

Muestra	Al(t)	As(t)	Ba(t)	B(t)	Ca(t)	Cd(t)	Cu(t)	Fe(t)	K(t)
Promedio	0.267	20.86	0.447	203.7	298.6	2486.5	819.8	1.621	247.8

Nota. Tabla de datos tomados de planta

Tabla 3

Concentraciones (mg/L) de metales pesados en ARI

Muestra	Li(t)	Mg(t)	Mn(t)	Na(t)	Ni(t)	SiO ₂ (t)	Sr(t)	Zn(t)
Promedio	28.9	52.0	1.4	5196	485.818	17.3	3.3	0.69

Nota. Tabla de datos tomados de planta

2.3 Marco legal

- Ley N° 28611. *Ley General del Ambiente*, en el cual mediante el artículo I, se establece que: “Toda persona tiene derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida y debe contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus

componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país”.

- D.S. N° 004-2017-MINAM *Estándares de Calidad Ambiental para Agua*, en el cual se define: “Los ECA son indicadores de calidad ambiental, en los cuales se mide las concentraciones de elementos, sustancias u otros en el aire, agua o suelo en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni el ambiente”.
- Ley N° 29338 *Ley de Recursos Hídricos*, aprobado por D.S. N° 001-2010-AG, donde a través del artículo N° 131, se define que: “La Autoridad Nacional autoriza el vertimiento de aguas residuales tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambientales y de Salud sobre el cumplimiento de los Estandartes de Calidad Ambiental (ECA-agua) y Límites Máximos Permisibles (LMP)”.
- D.S. 010-2010-MINAM *Límites Máximos Permisibles para Descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas*, en la cual se establece valores como límites permisibles para las descargas de la actividad minero – metalúrgico siendo estos los siguientes:

Figura 18*LMP para descargas de efluentes de actividad minero metalúrgico*

PARÁMETRO	UNID	LÍMITE EN CUALQUIER MOMENTO	LÍMITE PARA EL PROMEDIO ANUAL
pH	-	6 – 9	6 – 9
Sólidos Totales en Suspensión.	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cloruro Total	mg/L	1	0.8
Arsénico Total	mg/L	0.1	0.08
Cadmio Total	mg/L	0.05	0.04
Cromo Hexavalente	mg/L	0.1	0.08
Cobre Total	mg/L	0.5	0.4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1.6
Plomo Total	mg/L	0.2	0.16
Mercurio Total	mg/L	0.002	0.0016
Zinc Total	mg/L	1.5	1.2

Nota. De D.S. 010-2010-MINAM.

- D.S. 031-2010-SA “Reglamento de la Calidad del Agua para consumo humano”, en la cual se establece un nuevo marco normativo para la gestión de la calidad del agua para consumo humano, así como valores en relación a los límites máximos permisibles para tal fin, siendo estas las siguientes:

Figura 19*LMP de parámetros de calidad organoléptica*

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Olor	---	Aceptable
2. Sabor	---	Aceptable
3. Color	UCV escala Pt/Co	15
4. Turbiedad	UNT	5
5. pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6. Conductividad (25°C)	µmho/cm	1 500
7. Sólidos totales disueltos	mg L ⁻¹	1 000
8. Cloruros	mg Cl ⁻ L ⁻¹	250
9. Sulfatos	mg SO ₄ ⁼ L ⁻¹	250
10. Dureza total	mg CaCO ₃ L ⁻¹	500
11. Amoníaco	mg N L ⁻¹	1,5
12. Hierro	mg Fe L ⁻¹	0,3
13. Manganeso	mg Mn L ⁻¹	0,4
14. Aluminio	mg Al L ⁻¹	0,2
15. Cobre	mg Cu L ⁻¹	2,0
16. Zinc	mg Zn L ⁻¹	3,0
17. Sodio	mg Na L ⁻¹	200

UCV = Unidad de color verdadero
 UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad

Nota. De D.S. 031-2010-SA.

Figura 20*LMP de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos*

Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Antimonio	mg Sb L ⁻¹	0,020
2. Arsénico (nota 1)	mg As L ⁻¹	0,010
3. Bario	mg Ba L ⁻¹	0,700
4. Boro	mg B L ⁻¹	1,500
5. Cadmio	mg Cd L ⁻¹	0,003
6. Cianuro	mg CN ⁻ L ⁻¹	0,070
7. Cloro (nota 2)	mg L ⁻¹	5
8. Clorito	mg L ⁻¹	0,7
9. Clorato	mg L ⁻¹	0,7
10. Cromo total	mg Cr L ⁻¹	0,050
11. Flúor	mg F L ⁻¹	1,000
12. Mercurio	mg Hg L ⁻¹	0,001
13. Niquel	mg Ni L ⁻¹	0,020
14. Nitratos	mg NO ₃ L ⁻¹	50,00
15. Nitritos	mg NO ₂ L ⁻¹	3,00 Exposición corta 0,20 Exposición larga
16. Plomo	mg Pb L ⁻¹	0,010
17. Selenio	mg Se L ⁻¹	0,010
18. Molibdeno	mg Mo L ⁻¹	0,07
19. Uranio	mg U L ⁻¹	0,015

Nota. Tomado del D.S. 031-2010-SA.

III. MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación según el objetivo que se persigue es aplicado, ya que se busca encontrar conocimientos que se puedan aplicar para resolver un problema, para nuestro planteamiento se pretende encontrar la mejor técnica para reducir al máximo permitido la presencia de iones disueltos presentes en los efluentes mineros de la unidad catalina huanca. el diseño metodológico desde un enfoque cuantitativo es experimental, y debido a su grado de manipulación de la variable independiente se clasifica dentro de los experimentales puros, puesto que se manipuló intencionalmente una de las variables, es decir la variable independiente (OI), para alcanzar una finalidad sobre la variable dependiente (efluente minero).

3.2 *Ámbito temporal y espacial*

3.2.1 *Ámbito espacial*

El presente trabajo de investigación corresponde al área de la UM Catalina Huanca ubicada en la jurisdicción política de los distritos de Canaria y Apongo, provincia de Víctor Fajardo, departamento de Ayacucho, las pruebas serán llevados a cabo en los laboratorios de la misma UM. La operación considera labores subterráneas, depósitos de desmonte, una planta de beneficio denominada San Jerónimo con una capacidad autorizada de 2300 TMD para la producción de concentrados de Pb y Zn, así como una infraestructura compuesta por depósitos de relaves, laboratorios, oficinas administrativas, vías de acceso entre instalaciones, campamentos y otras instalaciones.

3.2.2 *Ámbito temporal*

El desarrollo del presente trabajo de investigación será llevado a cabo durante los meses comprendidos entre enero y setiembre del año 2020; utilizando información bibliográfica de los años 2005 al 2019.

3.3 Variables

- **Variable Dependiente:** Remoción de iones disueltos
- **Variable Independiente:** Procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa

Figura 21*Operacionalización de las variables*

Variables	Dimensiones	Indicador	Unidad	Instrumentos
Variable Dependiente: Remoción de Iones Disueltos	Rendimiento	Eficiencia	%	Ficha de registros
		Concentración inicial	mg/L	
		Concentración final	mg/L	
	Parámetros químicos	Métodos estandarizados	K	mg/L
			Na	mg/L
			CO ₃	mg/L
			Mg	mg/L
			Ca	mg/L
			HCO ₃	mg/L
		Ficha de registros	Cl	mg/L
			B	mg/L
			CO ₂	mg/L
			SO ₄	mg/L
	Parámetros fisicoquímicos	Conductividad	uS/cm	Ficha de registro
pH		Unidad de pH		
TDS		mg/L		
Procesos de ultrafiltración y Ósmosis Inversa	Características del tratamiento ultrafiltración	Tipo de membrana		Ficha de registros
		Presión	Bar	
		Porosidad	nm - um	
	Características del tratamiento ósmosis inversa	Tipo de membrana		
		Porosidad	nm - um	
		Presión	Bar	

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

Efluente minero generado en la operación de extracción y procesamiento del mineral concerniente a un caudal de 54 m³/h.

3.4.2 Muestra

El presente trabajo de investigación se realizó bajo la toma de muestras para tres pilotos, cada muestra con volumen de 20 litros aproximadamente, la cual fue recolectada en el efluente de la salida del proceso de pretratamiento.

3.5 Instrumentos

- **Observacional.** Dicha técnica consiste en identificar y ubicar los lugares donde se genera los efluentes mineros dentro de la UM en la UM Catalina Huanca.
- **Ficha técnica de datos.** Se elaboró un cuadro donde se reportó los valores y características de los iones disueltos durante el análisis.

3.6 Procedimientos

Para el desarrollo de la presente investigación se tuvo que considerar una serie de etapas a fin de alcanzar los objetivos propuestos desde el inicio del proyecto hasta el final, así tenemos:

- Elección de la zona de estudio, en el cual se consideró trabajar con los efluentes mineros provenientes del proceso de extracción y procesamiento del mineral de la UM Catalina Huanca, facilitado por la empresa para el desarrollo de la investigación.
- Toma de muestra procedente del pretratamiento (físicoquímico), etapa donde se realiza la remoción inicial de los iones disueltos en el efluente que provienen de mina.
- Caracterización (análisis físicoquímico) del efluente a tratar, a fin de conocer las concentraciones de los iones disueltos que entraran a los siguientes procesos de ultrafiltración y OI.

- Toma de muestras de efluente minero y realizar pruebas de neutralización y floculación hasta alcanzar la mayor remoción posible de iones disueltos, dentro de los cuales tenemos a las sales en general y los metales pesados.
- Desarrollo de pruebas de sedimentación a fin de alcanzar la mayor clarificación posible del efluente tratado en su etapa inicial.
- Desarrollo inicial de pruebas de ultrafiltración, proceso de ultrafiltración esta entre los rangos de 0.02-0.03 micras, quiere decir que se captura solidos suspendidos, materia coloidal, virus y etc., a fin de evaluar la retención y eficiencia de los filtros a utilizar en esta etapa del proceso.
- Desarrollo inicial de pruebas de nano-filtración de 0.001 micras, en la cual se realiza la captura de iones divalentes como por ejemplo Ca^{+2} , Al^{+3} y SO_4^{-2} , a fin de evaluar la retención y eficiencia de los filtros a utilizar en esta etapa del proceso.
- Desarrollo de pruebas de OI, el cual se encuentra en el rango de 0.0001 micras. (1 micra = 10^{-3} mm), como prueba final del efluente de los anteriores procesos evaluando la presión a tomar en cuenta a fin de obtener la mayor eficiencia posible.
- Caracterización final (análisis fisicoquímico) del efluente tratado, a fin de conocer las concentraciones de los iones disueltos después de los procesos de ultrafiltración y OI.
- Se realizan finalmente pruebas de evaporación, cristalización y centrifugación hasta obtención de un efluente tratado con alta eficiencia.
- Análisis de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de laboratorio.
- Interpretación y discusión de los resultados obtenido en los ensayos de laboratorio.
- Elaboración y redacción final del trabajo de investigación que incluye las conclusiones y recomendaciones.

3.7 Análisis de datos

Una vez concluida la etapa de recolección de datos obtenidos en base a los resultados, se deben iniciar con el análisis de datos estadístico para conocer el nivel de confianza de los mismos. Este aspecto es importante ya que nos muestra indicadores de la calidad del trabajo final.

El análisis de datos cuantitativos se realizará tomando en cuenta los niveles de medición de las variables y mediante la estadística que permitirá describir y poner de manifiesto las principales características de las variables, tomadas individualmente. Para describir y analizar cada una de las variables se utilizara el programa Ms. Excel 2010; además el programa Ms. Excel 2010, se usará para la estadística correlacional; presentación de datos en tablas y gráficas para presentar la distribución de los datos mediante graficas lineales a fin de conocer el comportamiento de la variable dependiente en relación a las variaciones que será sujeta la variable independiente, así mismo servirá para mostrar los datos porcentuales; y para estimar parámetros y probar hipótesis (contrastar la hipótesis).

Los datos obtenidos durante la experimentación serán comparados con los LMP para comparar las concentraciones antes y después del tratamiento, así mismo se usarán los programas de Excel para la interpretación de resultados.

IV. RESULTADOS

En el siguiente cuadro se muestra las dosis iniciales consideradas para cada prueba a nivel piloto, el cual empieza con una dosis de Hipoclorito de Sodio de 10 mg/L (valor ya conocido) para lograr la oxidación del As⁺³ a As⁺⁵, estado en el cual se alcanzará la precipitación del metal, para luego pasar a ajustar los valores de pH a valores deseados e iniciar el proceso de ultrafiltración para la retención principalmente de materiales finos coloidales.

Tabla 4

Pruebas a nivel piloto

Prueba	Oxidación NaClO	Coagulación Hierro	Ajuste pH Ca(OH) ₂	pH final de Pre-tratamiento
	Dosis reactivo puro ppm	Dosis reactivo puro (si fuera Fe ₂ (SO ₄) ₃) ppm	Dosis (reactivo puro) g/L	
1	10.0	500.0	0.9	7.5
2	10.0	250.0	1.3	8.0
3	10.0	50.0	2.4	8.5

Para encontrar el tratamiento más eficiente se trabajó en función a tres pruebas piloto y se consideraron dosis diferentes de sulfato férrico (500, 250 y 50 mg/L) y llevados a pH de 7.5, 8.0 y 8.5, respectivamente.

4.1 Objetivo 1: Resultados del pretratamiento

En los siguientes cuadros se muestran las concentraciones obtenidas en la etapa de Pretratamiento, así como también los resultados para el permeado 1 y 2 de OI.

4.1.1 Prueba piloto N° 1

Ensayo de la prueba piloto N° 1. Para la prueba piloto N° 1, el ensayo se desarrolló bajo condiciones controladas de pH igual a 7.5. (ver Tabla 6)

Tabla 5*Prueba 1, concentraciones de pretratamiento y permeado 1*

Parámetro	Pretratamiento (mg/L)	Permeado 1 (mg/L)	LMP N° 010-2010- MINAM	LMP DS N° 031-2010-SA
As	0,00	0,00	0,1	0,01
K	720,60	62,62	---	---
Na	13 112,15	521,39	---	200,00
Mg	99,10	0,39	---	---
Ca	52,50	0,20	---	---
Sr	3,10	0,01	---	---
CO ₃ ⁻²	185,58	0,18	---	---
HCO ₃ ⁻	5 000,00	417,56	---	---
Cl ⁻	17 458,66	613,53	---	250,00
SO ₄ ⁻²	781,50	3,70	---	250,00
B	732,58	304,70	---	1,50
CO ₂	81,84	117,74	---	---
TDS	41 600,59	3 362,27	---	1 000,00
pH	7,50	6,62	6-9	6,5 - 8,5
Conductividad (μS/cm)	81 400,00	6 862,00	---	1 500,00

En los resultados obtenidos en la etapa de pretratamiento se puede apreciar que el arsénico es el único elemento que llega removerse en su totalidad (0 mg/L), los demás elementos en estudio se encuentran en niveles elevados, superando los límites máximos permisibles de la norma D.S N° 031-2010-SA.

En relación al permeado 1, se aprecia que las concentraciones de la mayoría de los elementos se reducen considerablemente, sin embargo, el Na, Cl⁻, B, TDS y conductividad eléctrica, superan los LMP de la norma D.S N° 031-2010-SA. (ver Tabla 7)

Tabla 6*Prueba 1 concentraciones del permeado 1 y permeado 2*

Parámetro	Permeado 1 (mg/L)	Permeado 2 (mg/L)	LMP N° 010- 2010-MINAM	LMP DS N° 031-2010-SA
As	0,00	0,00	0,1	0,01
K	62,62	17,13	---	---
Na	521,39	211,21	---	200,00
Mg	0,39	0,01	---	---
Ca	0,20	0,00	---	---
Sr	0,01	0,00	---	---
CO ₃ ⁻²	0,18	22,11	---	---

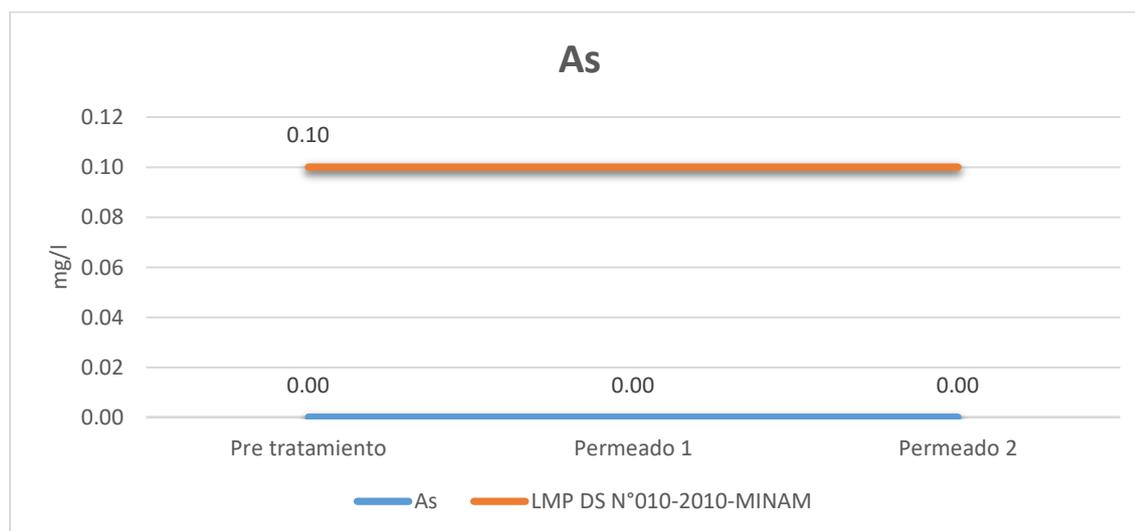
Parámetro	Permeado 1 (mg/L)	Permeado 2 (mg/L)	LMP N° 010- 2010-MINAM	LMP DS N° 031-2010-SA
HCO ₃ ⁻	417,56	117,21	---	---
Cl ⁻	613,53	76,09	---	250,00
SO ₄ ⁻²	3,70	0,07	---	250,00
B	304,70	84,51	---	1,50
CO ₂	117,74	0,07	---	---
TDS	3362,27	92,74	---	100,00
pH	6,62	9.00	6-9	6,5 - 8,5
Conductividad (μS/cm)	6 862,00	175,00	---	1500,00

En relación al permeado 2, se aprecia que las concentraciones de la mayoría de los elementos se reducen considerablemente hasta alcanzar los LMP, sin embargo, el Na y B, se encuentran por encima de los LMP de acuerdo a la norma D.S N° 031-2010-SA.

Análisis de los resultados de la prueba piloto 1. A continuación se muestran los resultados de la prueba piloto 1:

Figura 22

Prueba piloto 1, arsénico

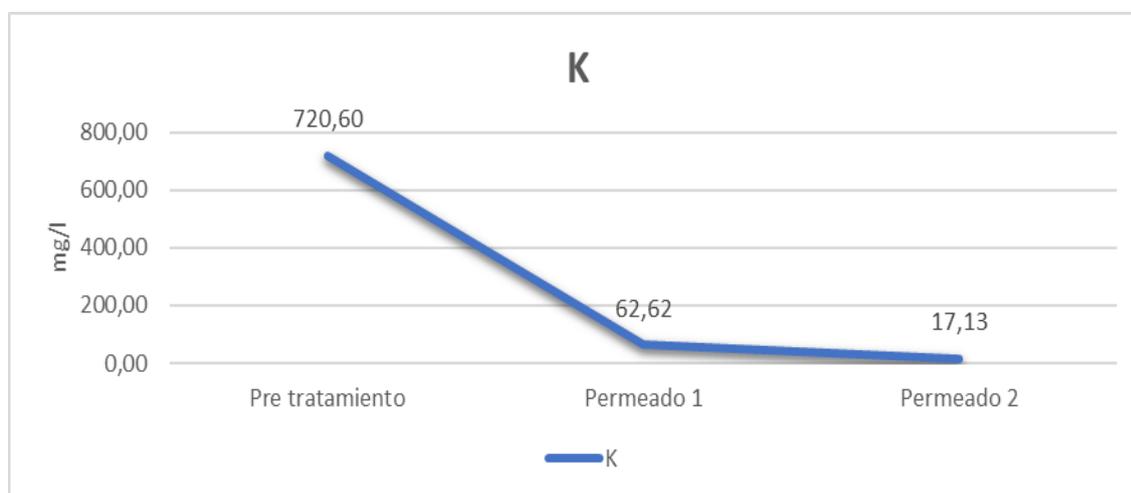


En la prueba piloto 1, para el caso del arsénico se puede apreciar que a la salida del pretratamiento sus concentraciones son removidas en su totalidad (0 mg/L), por lo que ya

ingresa a los permeados 1 y 2 de OI, libre de este metal, cumpliendo con el LMP para las normas del D.S N° 010-2010-MINAM y D.S N° 031-2010-SA.

Figura 23

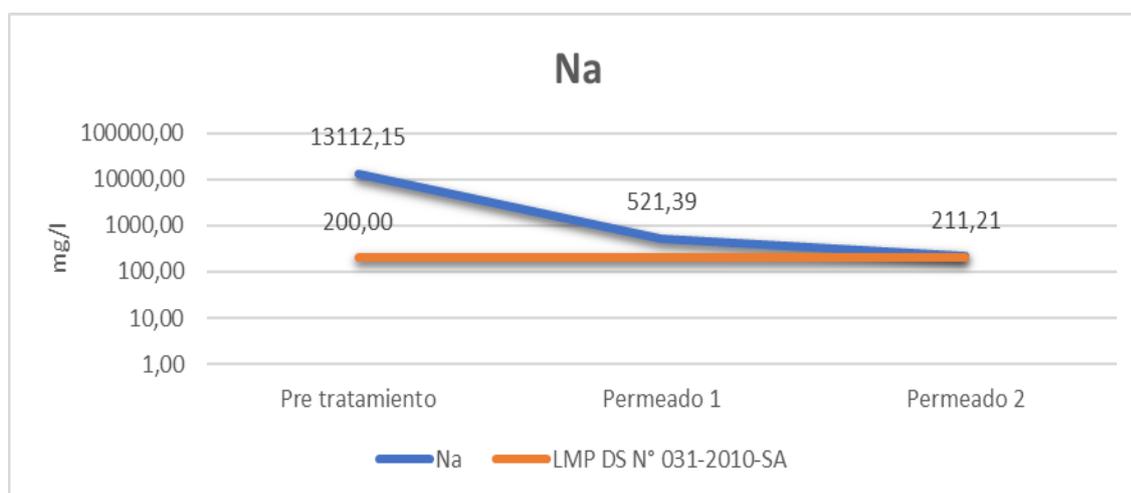
Prueba piloto 1, potasio



En relación a los niveles de potasio se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 720.6 mg/L en el pretratamiento, hasta la etapa final de 17.3 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 24

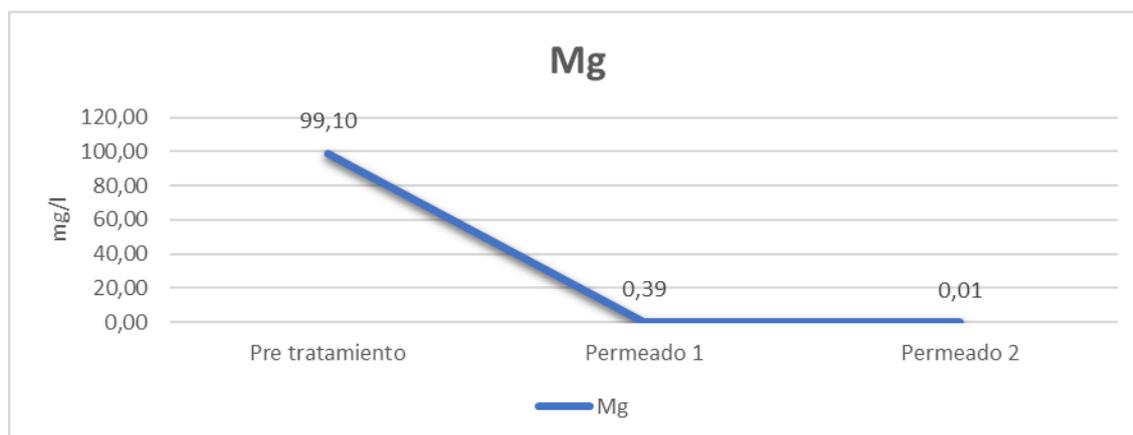
Prueba piloto 1, sodio



En cuanto al sodio se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 13 112.15 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 211.21 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento excede ligeramente el LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 25

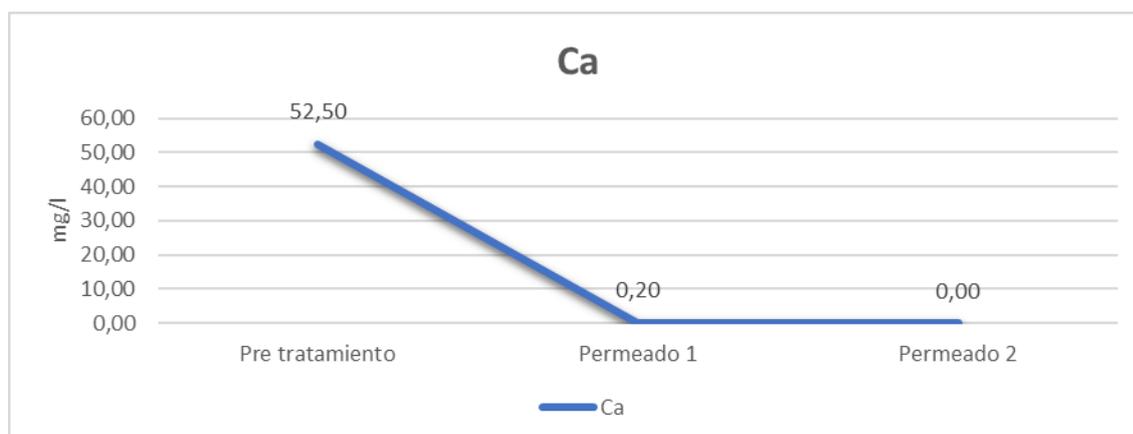
Prueba piloto 1, magnesio



Para los niveles de magnesio se puede observar que su concentración se reduce de 99.1 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 0.01 mg/l en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 26

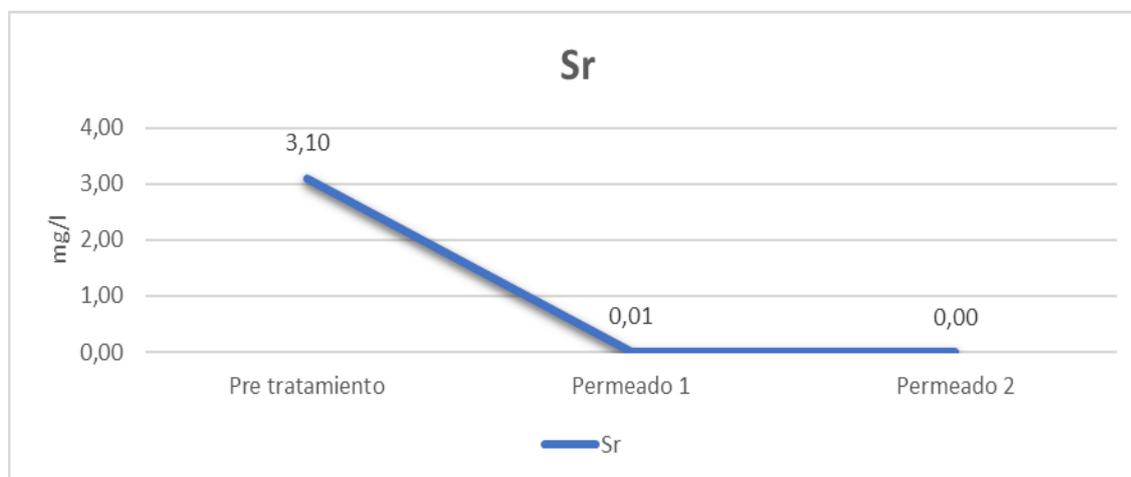
Prueba piloto 1, calcio



En cuanto al calcio se puede observar que su concentración se reduce de 52.5 mg/L en el pretratamiento hasta su remoción total en la etapa final (0.00 mg/L) en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 27

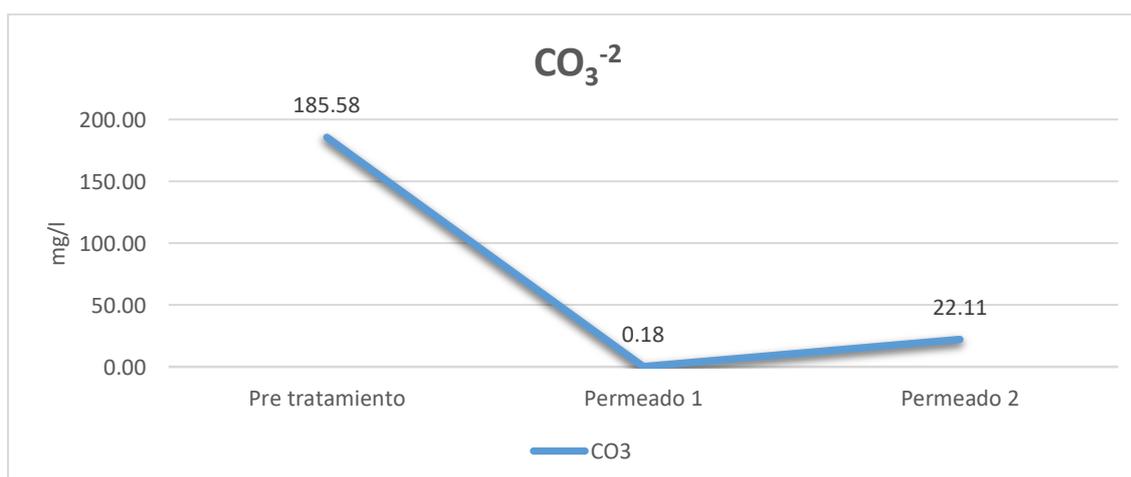
Prueba piloto 1, estroncio



En relación a los niveles del estroncio se puede observar que su concentración se reduce de 3.1 mg/L en el pretratamiento hasta su remoción total en la etapa final (0.00 mg/L) en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 28

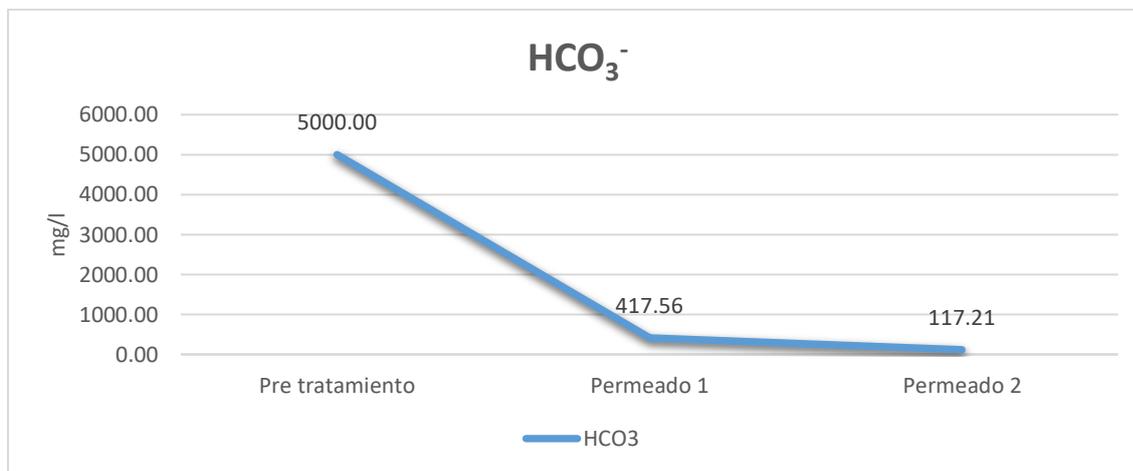
Prueba piloto 1, carbonatos



Para los niveles de carbonatos se aprecia que su concentración se reduce de 185.58 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 22.11 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto no cuenta con un LMP normado.

Figura 29

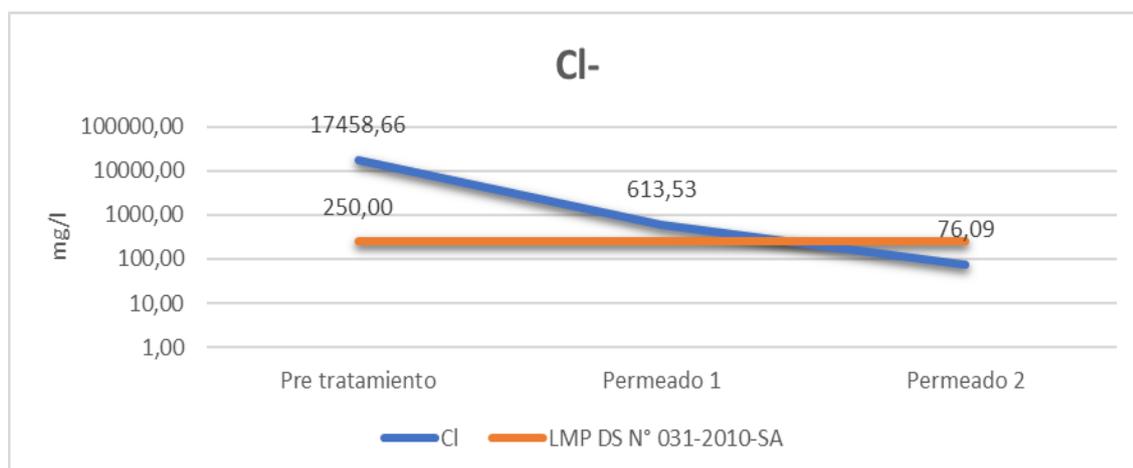
Prueba piloto 1, bicarbonatos



En relación a los bicarbonatos se aprecia que su concentración se reduce de 5 000.00 mg/L en el pretratamiento hasta alcanzar en la etapa final 117.21 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto no cuenta con un LMP normado.

Figura 30

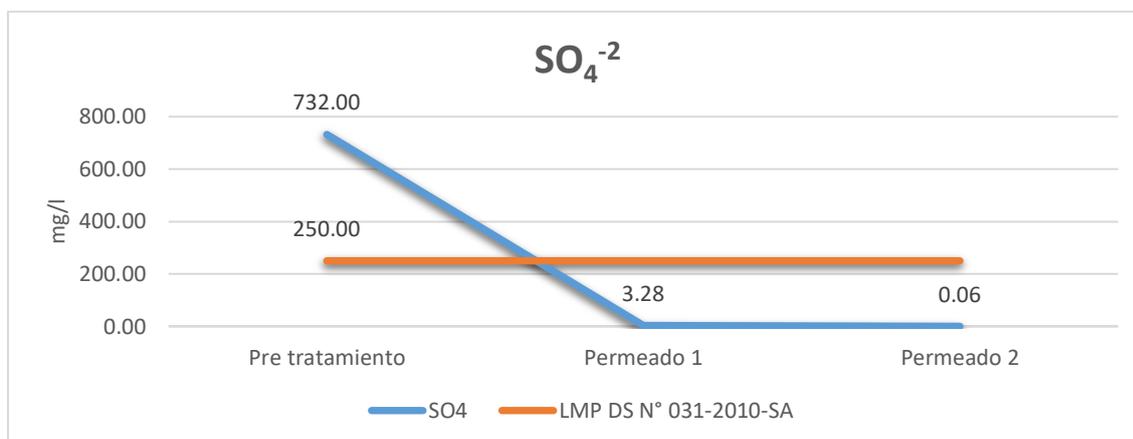
Prueba piloto 1, cloruro



El ion cloruro se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 17 458.66 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 76.09 mg/L en el permeado 2 de OI. Se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 31

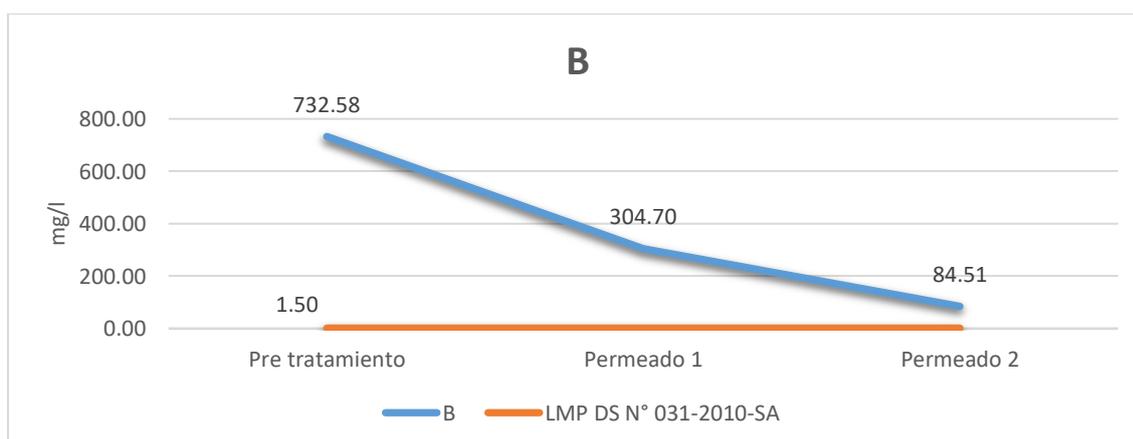
Prueba piloto 1, sulfatos



Para los niveles de sulfatos se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 781.50 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 0.07 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 32

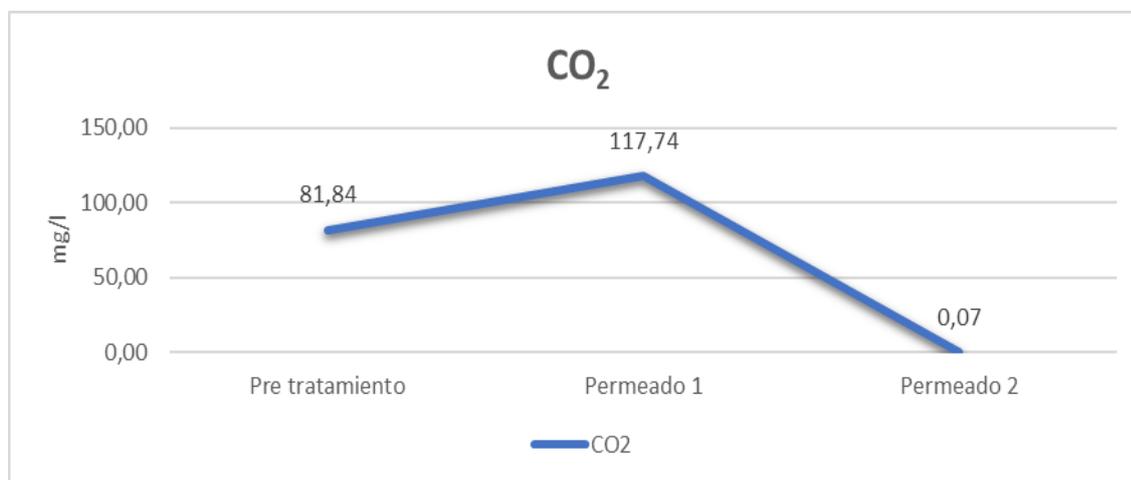
Prueba piloto 1, boro



En cuanto a los niveles de boro se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 732.58 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 84.51 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento excede el LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 33

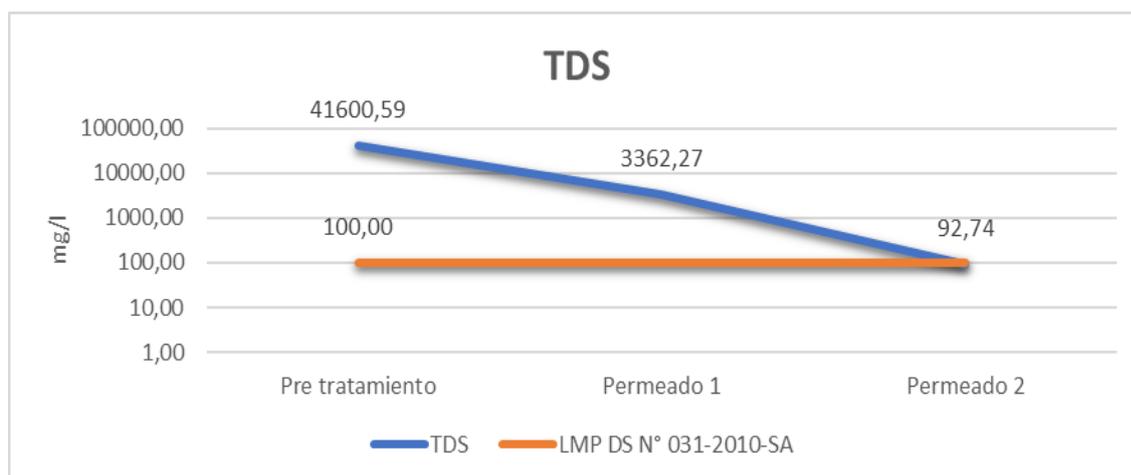
Prueba piloto 1, CO₂



Para los niveles de dióxido de carbono se aprecia que su concentración se reduce de 81.84 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 0.07 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto no cuenta con un LMP normado.

Figura 34

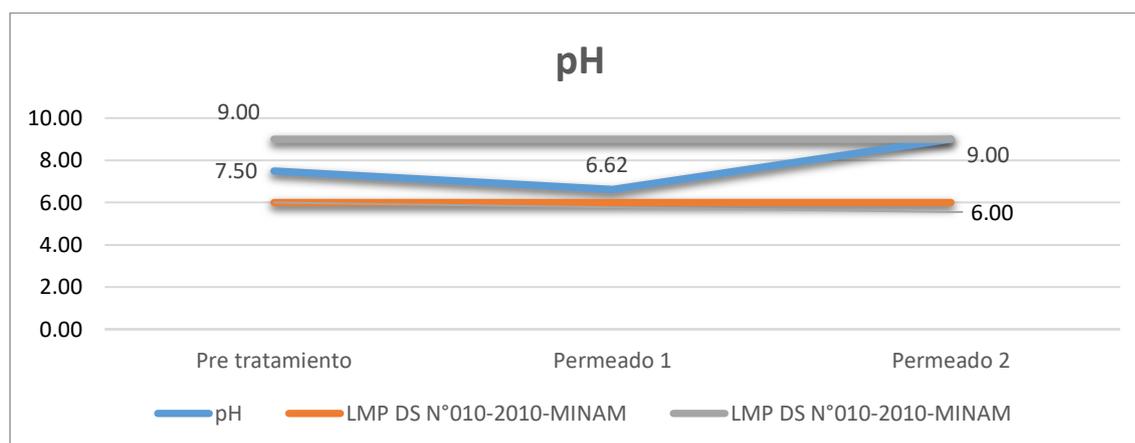
Prueba piloto 1, TDS



En relación a los niveles de TDS se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 41 600.59 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 92.74 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho parámetro se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 35

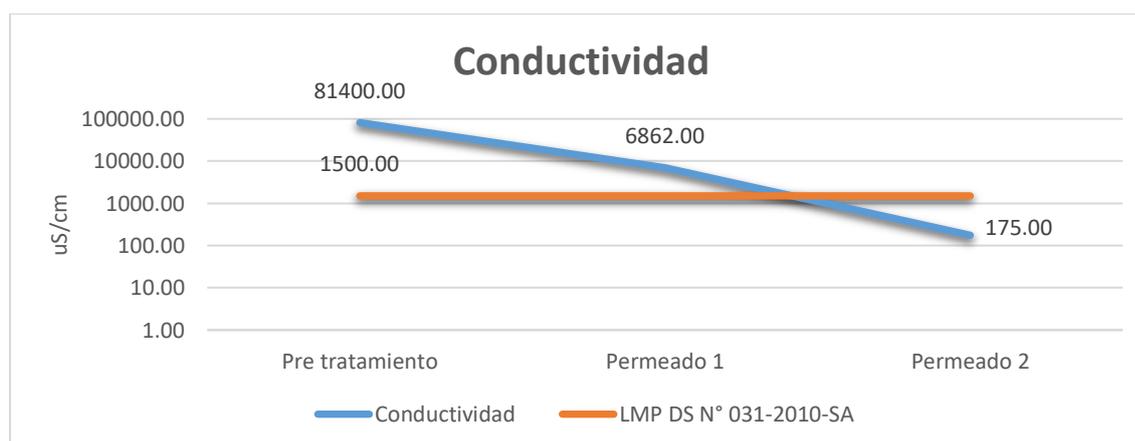
Prueba piloto 1, pH



El comportamiento del potencial de hidrógenos varía desde un nivel inicial de 7.5 en la etapa de pretratamiento hasta un valor final de 9.0 en el permeado 2 de OI, encontrándose dentro del LMP de acuerdo al D.S N° 010-2010-MINAM.

Figura 36

Prueba piloto 1, conductividad eléctrica



En cuanto a la conductividad eléctrica se puede observar que sus niveles se reducen considerablemente de 81 400 uS/cm en el pretratamiento hasta la etapa final de 175 uS/cm en el permeado 2 de OI. Dicho parámetro se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

4.1.2 Prueba piloto N° 2

Ensayo de la prueba piloto N° 2. Para la prueba piloto N° 2, el ensayo se desarrolló bajo condiciones controladas de pH igual a 8.0. (ver Tabla 8)

Tabla 7

Prueba 2, pretratamiento, permeado 1

Parámetro	Pre tratamiento (mg/L)	Permeado 1 (mg/L)	LMP N° 010-2010- MINAM	LMP DS N° 031-2010-SA
As	0,00	0,00	0,1	0,01
K	757,00	71,16	---	---
Na	13 301,72	507,38	---	200,00
Mg	88,00	0,34	---	---
Ca	81,10	0,31	---	---
Sr	22,00	0,09	---	---
CO ₃ ⁻²	530,45	1,54	---	---
HCO ₃ ⁻	2 813,00	278,05	---	---
Cl ⁻	18 224,28	641,27	---	250,00
SO ₄ ⁻²	732,00	3,28	---	250,00
B	730,06	273,65	---	1,50
CO ₂	9,14	6,19	---	---
TDS	40 593,53	3 060,55	---	100,00
pH	8,00	7,72	6-9	6,5 - 8,5
Conductividad (μS/cm)	79 200,00	6 260,00	---	1500,00

De acuerdo a los resultados obtenidos en la etapa de pretratamiento se puede ver que el arsénico es el único elemento que llega removerse en su totalidad (0 mg/L), los demás elementos en estudio se encuentran en niveles elevados, superando los LMP de la norma D.S N° 031-2010-SA.

En relación al permeado 1, se aprecia que las concentraciones de la mayoría de los elementos se reducen considerablemente, sin embargo, el Na, Cl-, B, TDS y conductividad superan los LMP de la norma D.S N° 031-2010-SA.

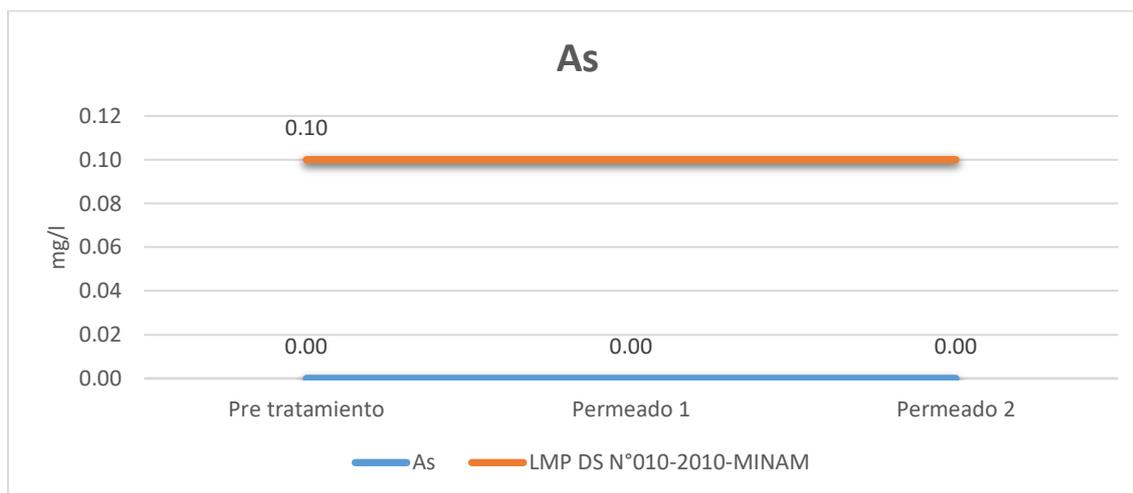
Tabla 8

Prueba 2, permeado 1 – permeado 1

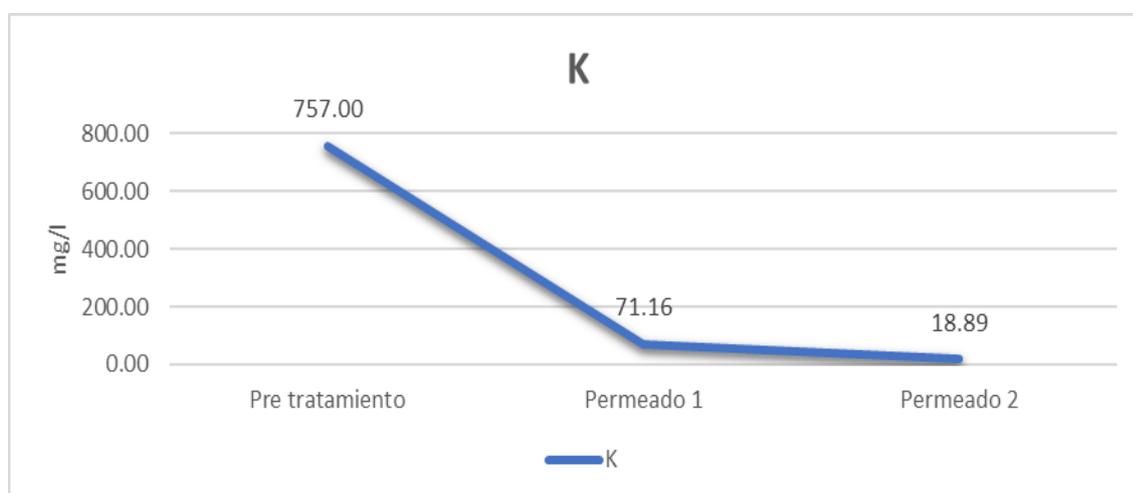
Parámetro	Permeado 1 (mg/L)	Permeado 2 (mg/L)	LMP N° 010-2010- MINAM	LMP DS N° 031-2010-SA
As	0,00	0,00	0,1	0,01
K	71,16	18,89	---	---
Na	507,38	182,35	---	200,00
Mg	0,34	0,01	---	---
Ca	0,31	0,00	---	---
Sr	0,09	0,00	---	---
CO ₃ ⁻²	1,54	56,57	---	---
HCO ₃ ⁻	278,05	12,80	---	---
Cl ⁻	641,27	80,12	---	250,00
SO ₄ ⁻²	3,28	0,06	---	250,00
B	273,65	44,14	---	1,50
CO ₂	6,19	0,00	---	---
TDS	3060,55	607,57	---	100,00
pH	7,72	10,74	6-9	6,5 - 8,5
Conductividad (μS/cm)	6 260,00	1241,00	---	1500,00

En relación al permeado 2, se aprecia que las concentraciones de la mayoría de los elementos se reducen considerablemente hasta alcanzar los LMP, sin embargo, el Na, B y pH se encuentran fuera de los LMP de acuerdo a la norma D.S N° 031-2010-SA.

Análisis de los resultados de la prueba piloto 2. A continuación se muestran los resultados de la prueba piloto 2:

Figura 37*Prueba piloto 2, arsénico*

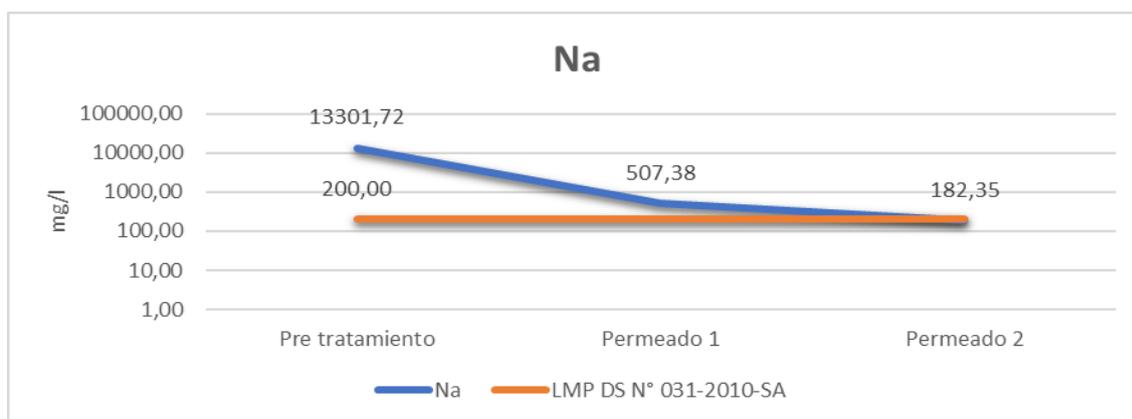
En la prueba piloto 1, para el caso del Arsénico se puede apreciar que a la salida del pretratamiento sus concentraciones son removidas en su totalidad (0 mg/L), por lo que ya ingresa a los permeados 1 y 2 de OI, libre de este metal, cumpliendo con el LMP para las normas del D.S N° 010-2010-MINAM y D.S N° 031-2010-SA.

Figura 38*Prueba piloto 2, potasio*

En relación a los niveles de potasio se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 757.0 mg/L en el pretratamiento, hasta la etapa final de 18.89 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 39

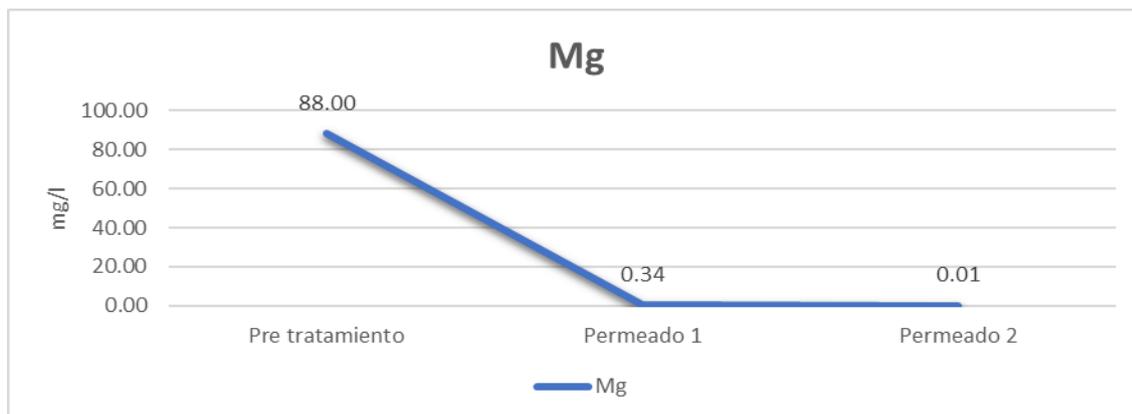
Prueba piloto 2, sodio



En cuanto al sodio se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 13 301.72 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 182.35 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento se encuentra dentro del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 40

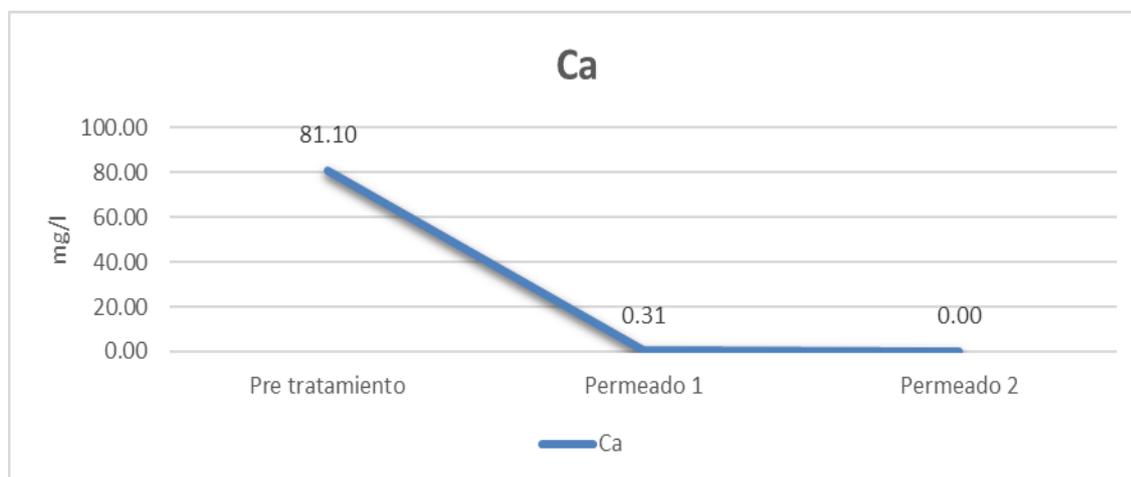
Prueba piloto 2, magnesio



Para los niveles de magnesio se puede observar que su concentración se reduce de 88.0 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 0.01 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 41

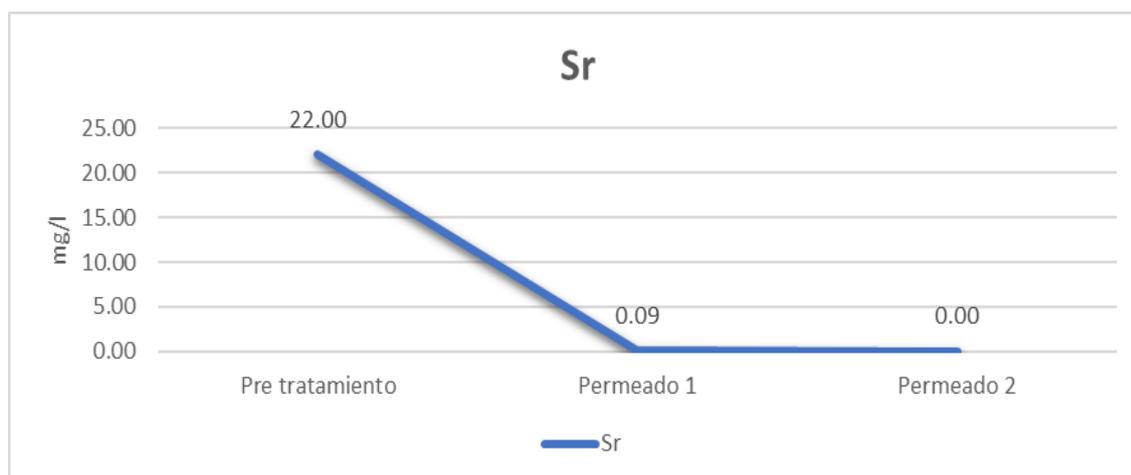
Prueba piloto 2, calcio



En cuanto al calcio se puede observar que su concentración se reduce de 81.1 mg/L en el pretratamiento hasta su remoción total en la etapa final (0.00 mg/L) en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 42

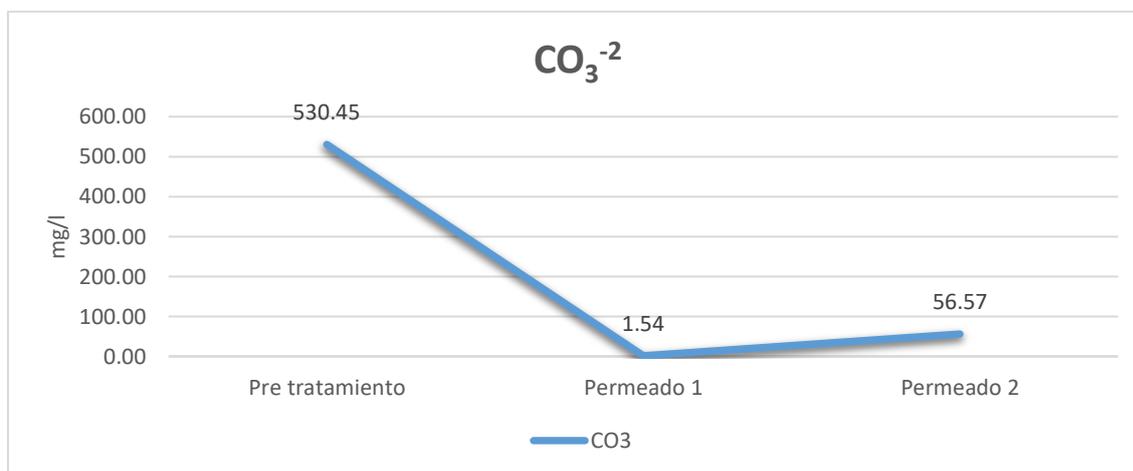
Prueba piloto 2, estroncio



En relación a los niveles del estroncio se puede observar que su concentración se reduce de 22.0 mg/L en el pretratamiento hasta su remoción total en la etapa final (0.00 mg/L) en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 43

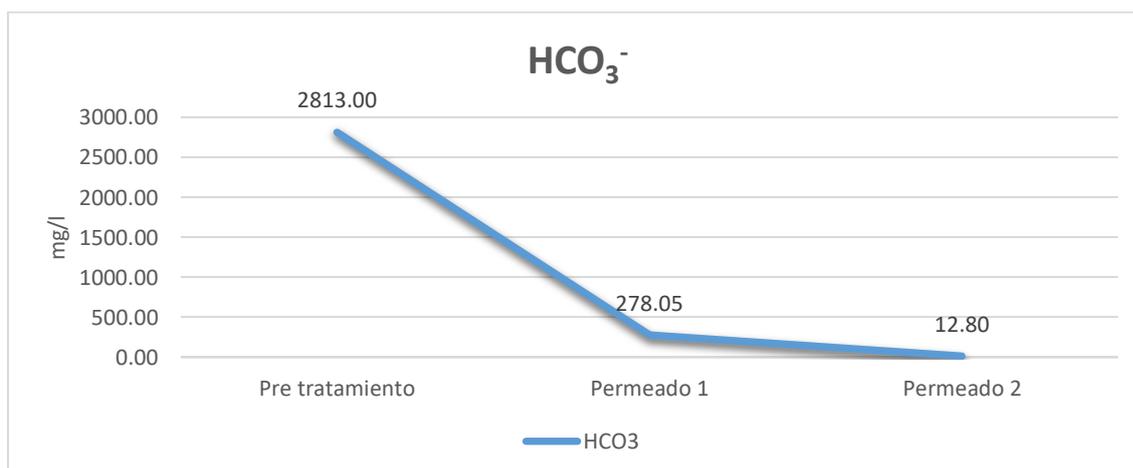
Prueba piloto 2, carbonatos



Para los niveles de carbonatos se aprecia que su concentración se reduce de 530.45 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 56.57 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto no cuenta con un LMP normado.

Figura 44

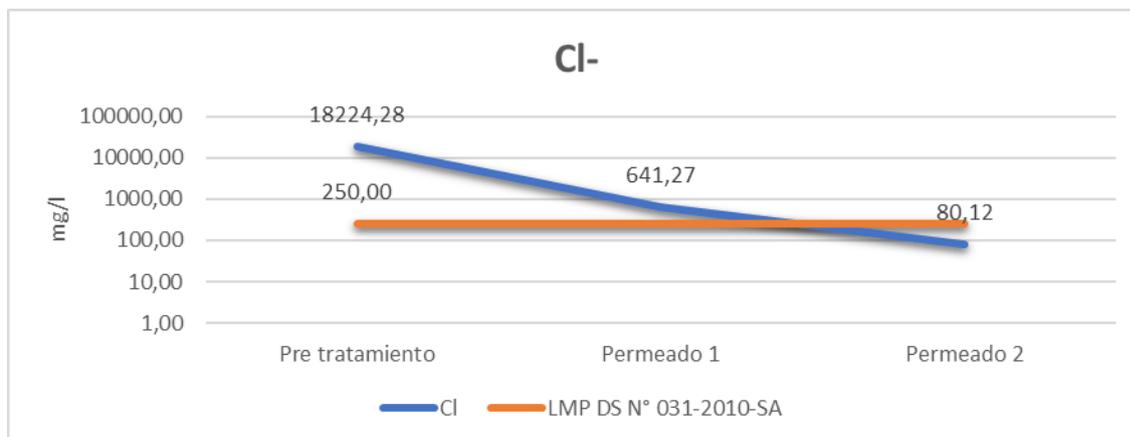
Prueba piloto 2, bicarbonatos



En relación a los bicarbonatos se aprecia que su concentración se reduce de 2813.00 mg/l en el pretratamiento hasta alcanzar en la etapa final 12.8 mg/l en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto no cuenta con un LMP normado.

Figura 45

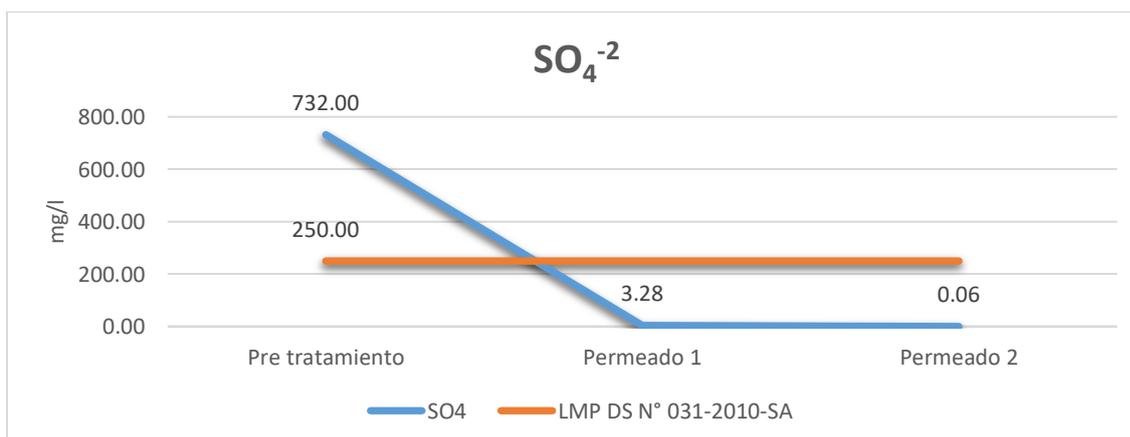
Prueba piloto 2, cloruro



En cuanto al ion cloruro se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 18 224.28 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 80.12 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 46

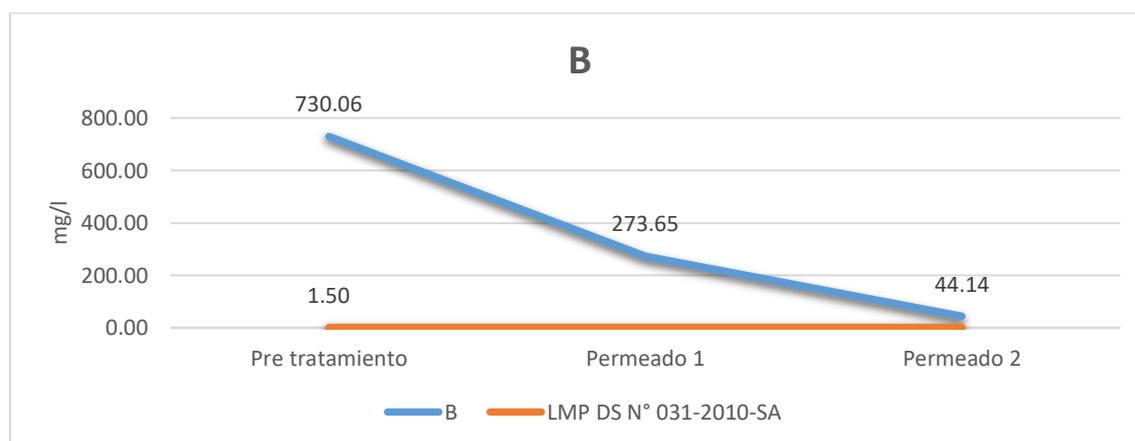
Prueba piloto 2, sulfatos



Para los niveles de sulfatos se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 732.0 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 0.06 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 47

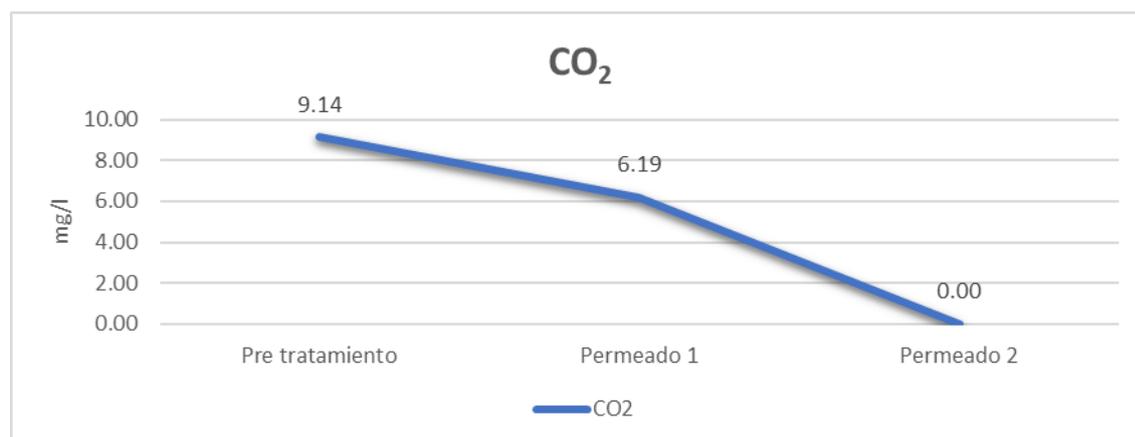
Prueba piloto 2, boro



En cuanto a los niveles de boro se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 730.06 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 44,14 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento excede el LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 48

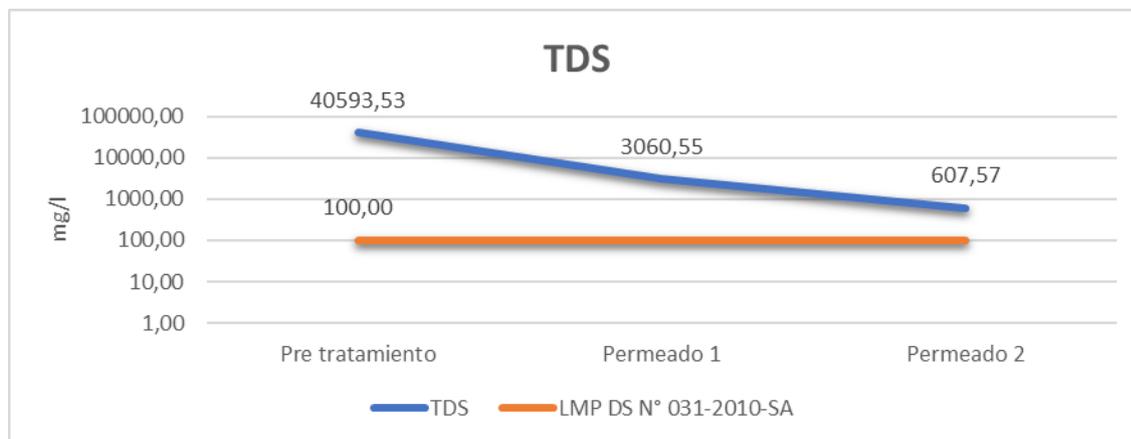
Prueba piloto 2, CO₂



Para los niveles de dióxido de carbono se aprecia que su concentración se reduce de 9.14 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 0.00 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto no cuenta con un LMP normado.

Figura 49

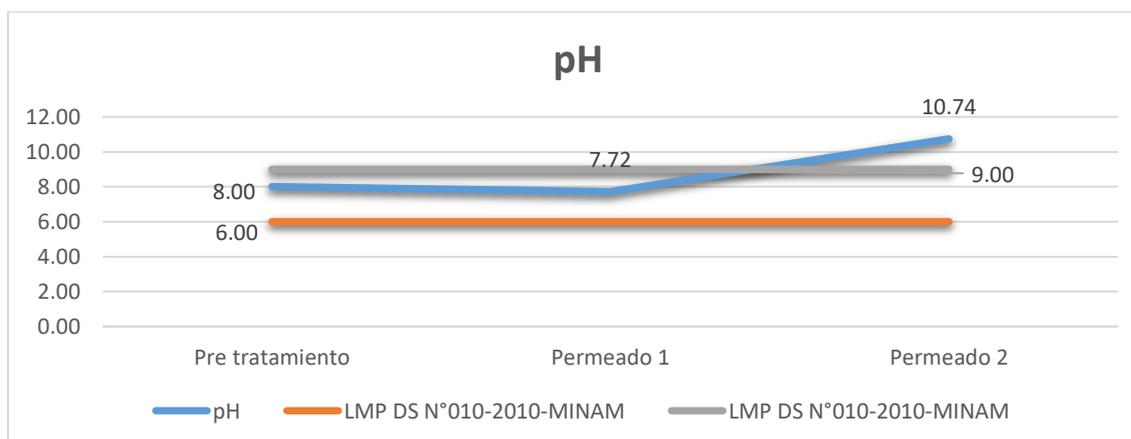
Prueba piloto 2, STD



En relación a los niveles de TDS se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 40 593.53 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 607.57 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho parámetro se encuentra por encima del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 50

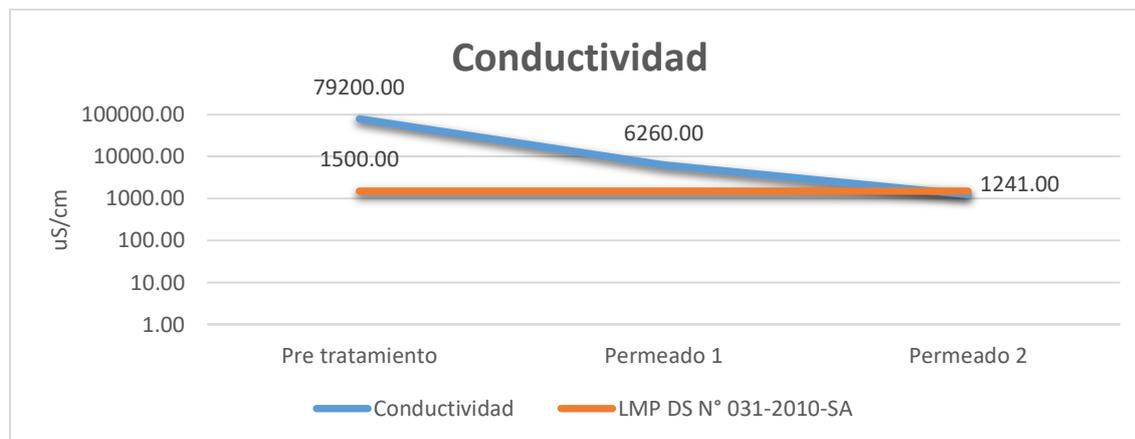
Prueba piloto 2, pH



El comportamiento del potencial de hidrógeno varía desde un nivel inicial de 8.0 en la etapa de pretratamiento hasta un valor final de 10.74 en el permeado 2 de OI, encontrándose por encima del LMP de acuerdo al D.S N° 010-2010-MINAM.

Figura 51

Prueba piloto 2, conductividad eléctrica



En cuanto a la conductividad eléctrica se puede observar que sus niveles se reducen considerablemente de 79 200 uS/cm en el pretratamiento hasta la etapa final de 1241 uS/cm en el permeado 2 de OI. Dicho parámetro se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

4.1.3 Prueba piloto N° 3

Ensayo de la prueba piloto 3. Para la prueba piloto N° 3, el ensayo se desarrolló bajo condiciones controladas de pH igual a 8.5. (ver Tabla 10)

Tabla 9

Prueba 3, pretratamiento, permeado 1

Parámetro	Pre tratamiento (mg/L)	Permeado 1 (mg/L)	LMP N° 010-2010-MINAM	LMP DS N° 031-2010-SA
As	0,00	0,00	0,1	0,01
K	754,00	64,05	---	---
Na	13 506,12	497,78	---	200,00

Mg	79,20	0,33	---	---
Ca	90,10	0,29	---	---
Sr	17,00	0,03	---	---
CO ₃ ⁻²	610,85	1,01	---	---
HCO ₃ ⁻	3046,12	129,01	---	---
Cl ⁻	19 254,08	622,37	---	250,00
SO ₄ ⁻²	791,43	3,91	---	250,00
B	755,16	295,15	---	1,50
CO ₂	34,34	26,16	---	---
TDS	35 593.53	865,25	---	100,00
pH	8,50	8,09	6-9	6,5 - 8,5
Conductividad (μS/cm)	71 200,00	1725,00	---	1500,00

Al igual que los ensayos de los pilotos anteriores, los resultados obtenidos en la etapa de pretratamiento se pueden apreciar que el arsénico es el único elemento que llega removerse en su totalidad (0 mg/L), los demás elementos en estudio se encuentran en niveles elevados, superando los LMP de la norma D.S N° 031-2010-SA.

En relación al permeado 1, se aprecia que las concentraciones de la mayoría de los elementos se reducen considerablemente, sin embargo, el Na, Cl⁻, B, TDS y conductividad superan los LMP de la norma D.S N° 031-2010-SA.

Tabla 10

Prueba 3, permeado 1 – permeado 2

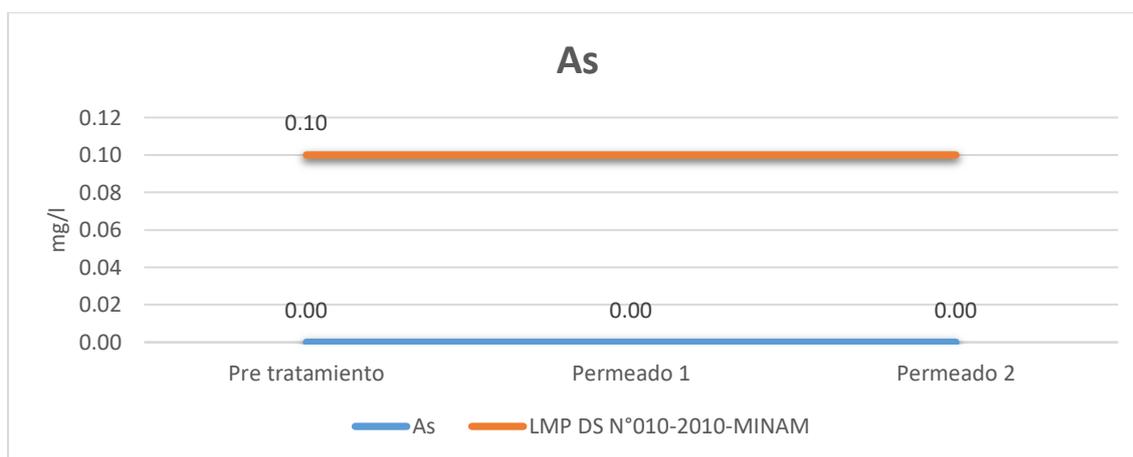
Parámetro	Permeado 1 (mg/L)	Permeado 2 (mg/L)	LMP N° 010-2010- MINAM	LMP DS N° 031-2010-SA
As	0,00	0,00	0,1	0,01
K	64,05	17,78	---	---
Na	497,78	292,65	---	200,00
Mg	0,33	0,01	---	---
Ca	0,29	0,00	---	---
Sr	0,03	0,00	---	---
CO ₃ ⁻²	1,01	98,57	---	---
HCO ₃ ⁻	129,01	92,70	---	---
Cl ⁻	622,37	94,65	---	250,00
SO ₄ ⁻²	3,91	0,12	---	250,00
B	295,15	91,24	---	1,50
CO ₂	26,16	0,12	---	---
TDS	865,25	75,47	---	100,00
pH	8,09	10,37	6-9	6,5 - 8,5
Conductividad (μS/cm)	1725,00	141,00	---	1500,00

En relación al permeado 2, se aprecia que las concentraciones de la mayoría de los elementos se reducen considerablemente hasta alcanzar los LMP, sin embargo, el Na, B y pH se encuentran por encima de los LMP de acuerdo a la norma D.S N° 031-2010-SA.

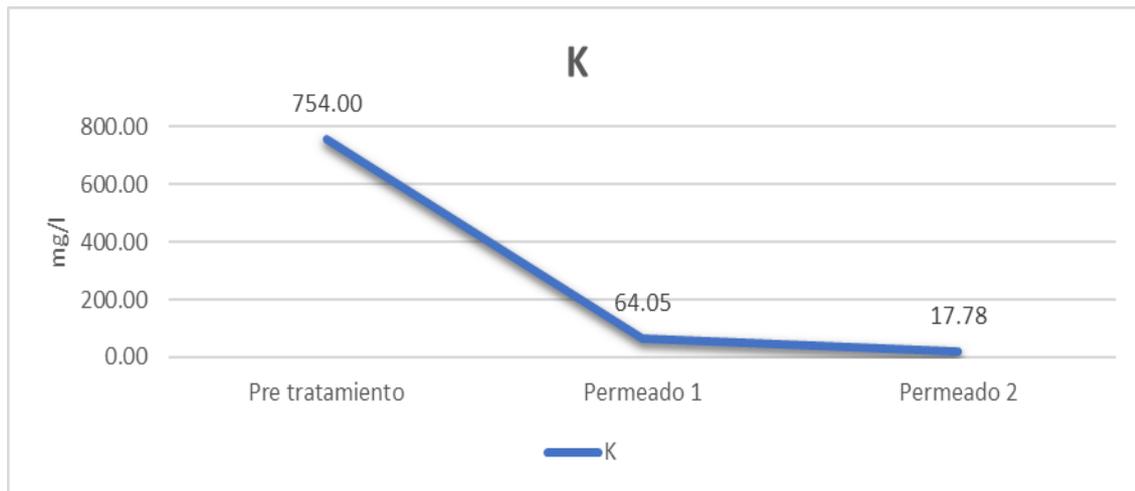
Análisis de los resultados de la prueba piloto 3. A continuación se muestran los resultados de la prueba piloto 3.

Figura 52

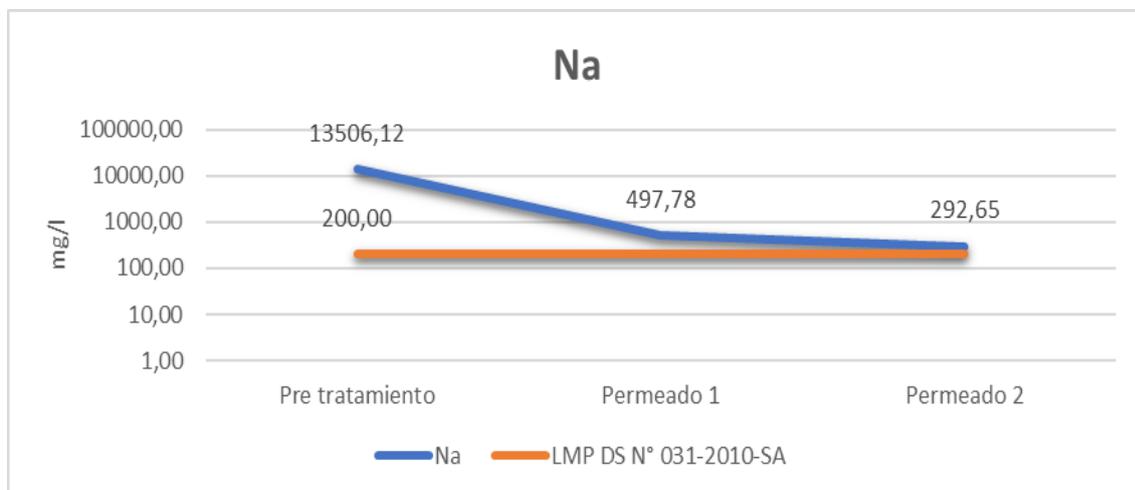
Prueba piloto 3, arsénico



En la prueba piloto 1, para el caso del arsénico se puede apreciar que a la salida del pretratamiento sus concentraciones son removidas en su totalidad (0 mg/L), por lo que ya ingresa a los permeados 1 y 2 de OI, libre de este metal, cumpliendo con el LMP para las normas del D.S N° 010-2010-MINAM y D.S N° 031-2010-SA.

Figura 53*Prueba piloto 3, potasio*

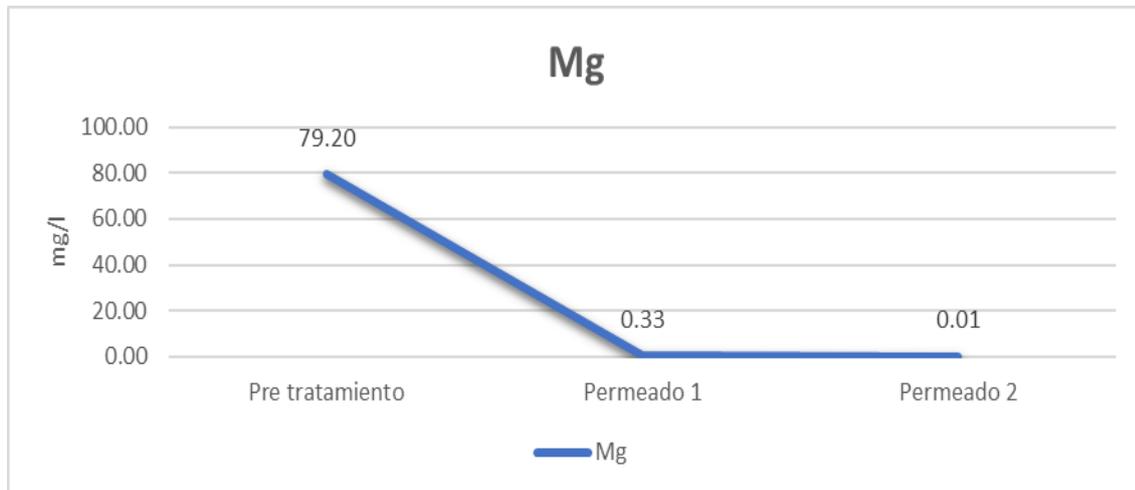
En relación a los niveles de potasio se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 745.0 mg/L en el pretratamiento, hasta la etapa final de 17.78 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 54*Prueba piloto 3, sodio*

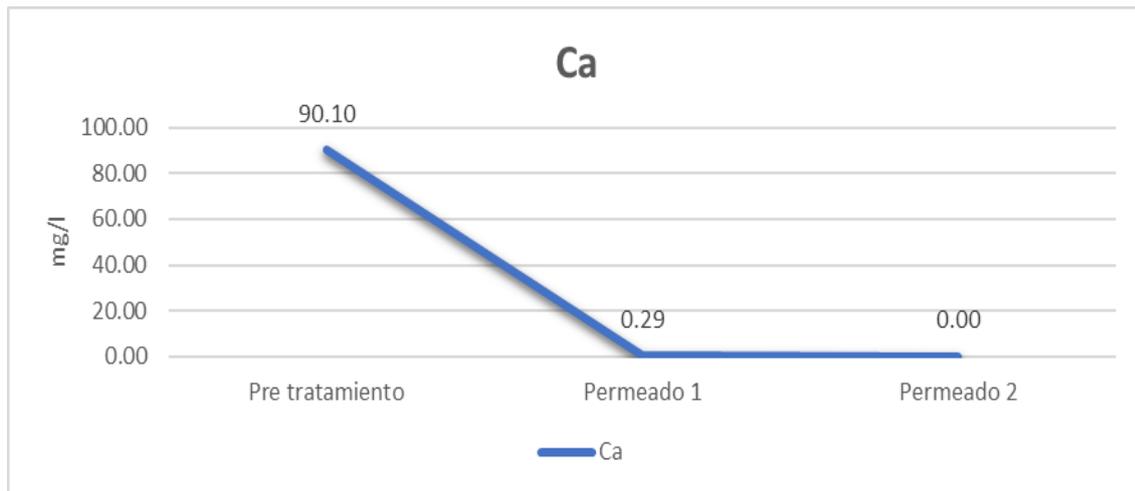
En cuanto al sodio se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 13 507.12 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 292.65 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento excede el LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 55

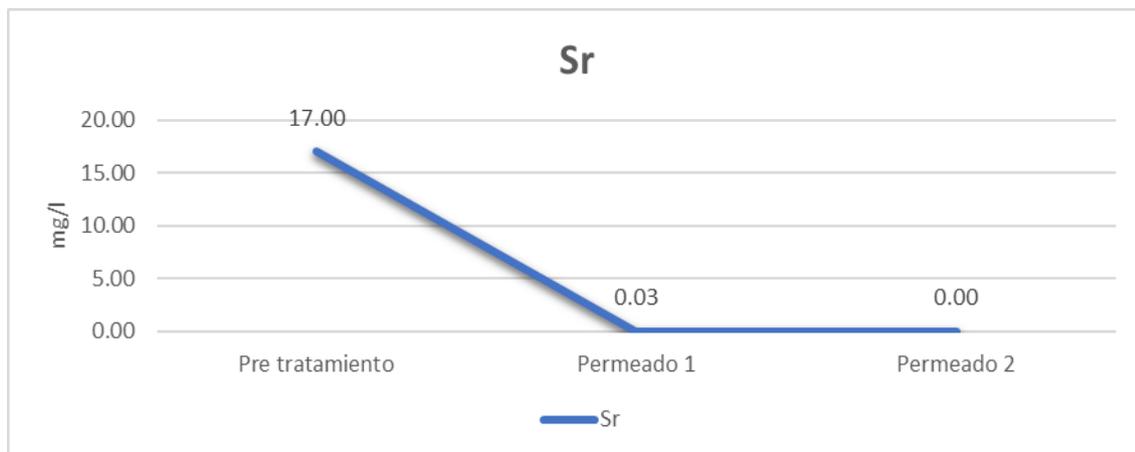
Prueba piloto 3, magnesio



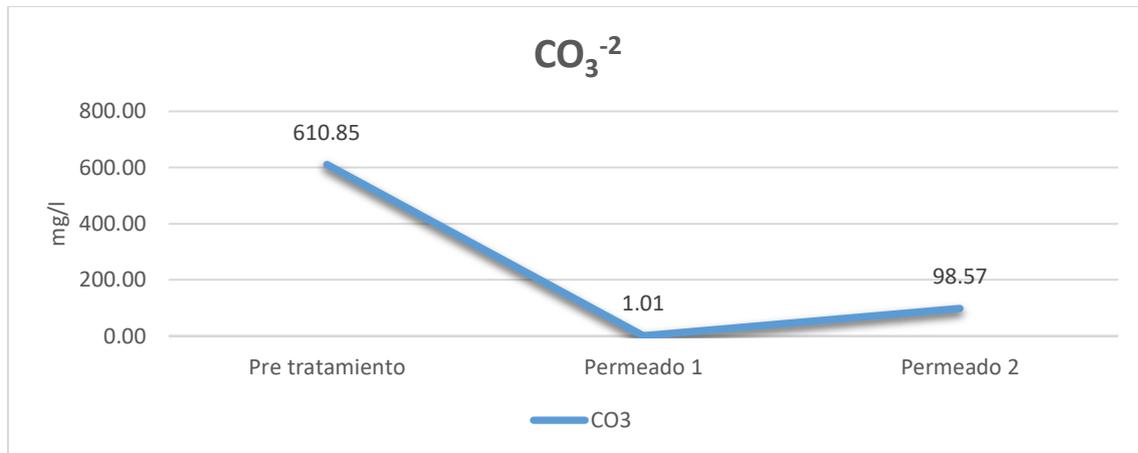
Para los niveles de magnesio se puede observar que su concentración se reduce de 79.2 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 0.01 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura**56***Prueba piloto 3, calcio*

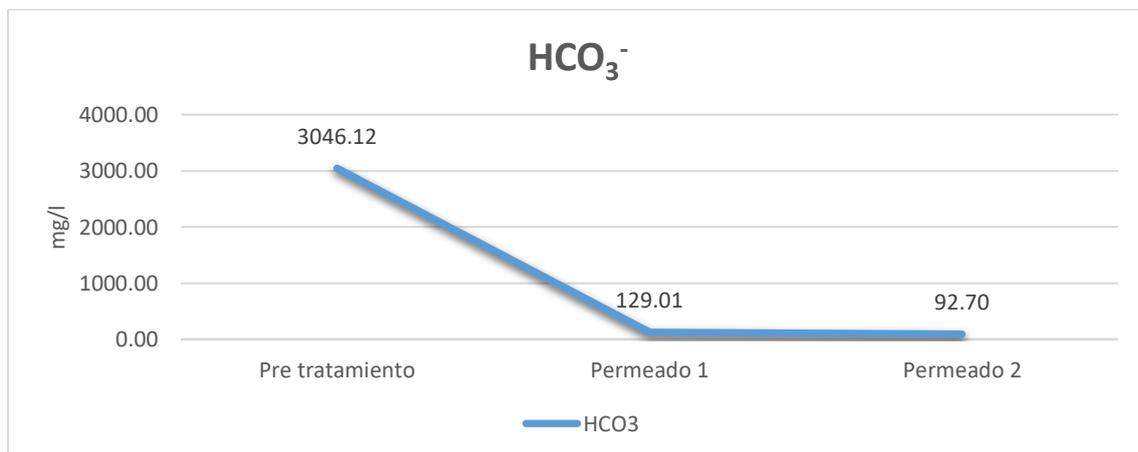
En cuanto al calcio se puede observar que su concentración se reduce de 90.1 mg/L en el pretratamiento hasta su remoción total en la etapa final (0.00 mg/L) en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 57*Prueba piloto 3, estroncio*

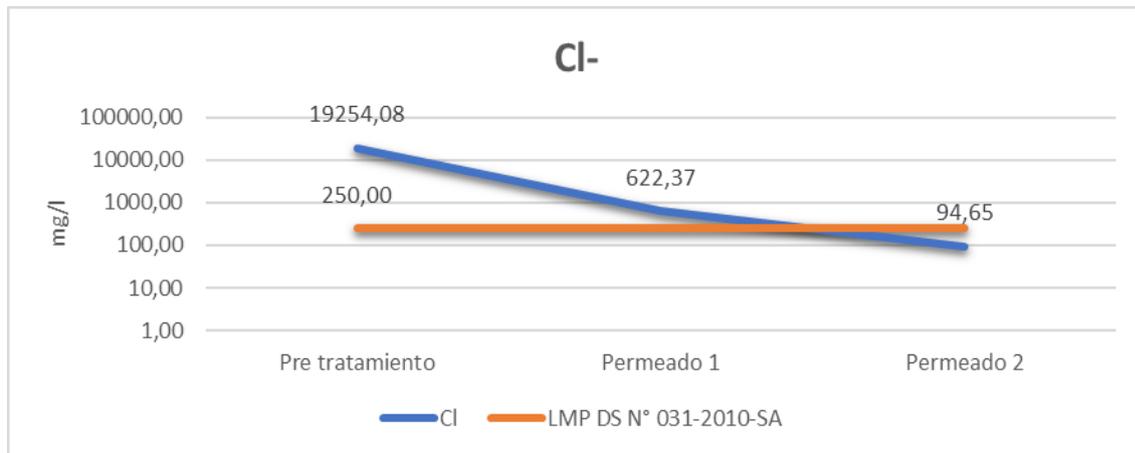
En relación a los niveles del Estroncio se puede observar que su concentración se reduce de 17.0 mg/L en el pretratamiento hasta su remoción total en la etapa final (0.00 mg/L) en el permeado 2 de OI. Dicho elemento no cuenta con un LMP normado.

Figura 58*Prueba piloto 3, carbonatos*

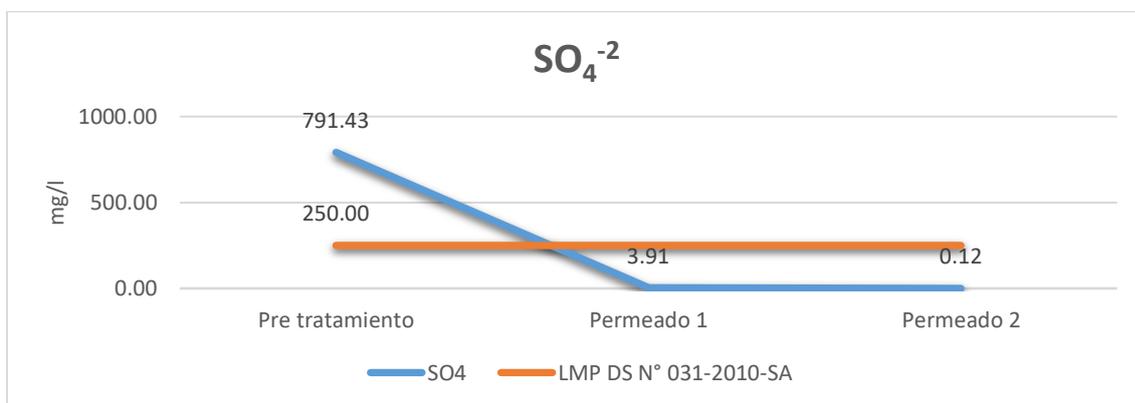
Para los niveles de carbonatos se aprecia que su concentración se reduce de 610.85 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 98.57 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto no cuenta con un LMP normado.

Figura 59*Prueba piloto 3, bicarbonatos*

En relación a los bicarbonatos se aprecia que su concentración se reduce de 3046.12 mg/L en el pretratamiento hasta alcanzar en la etapa final 92.70 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto no cuenta con un LMP normado.

Figura 60*Prueba piloto 3 cloruro*

En cuanto al ion cloruro se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 19 254.08 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 94.65 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

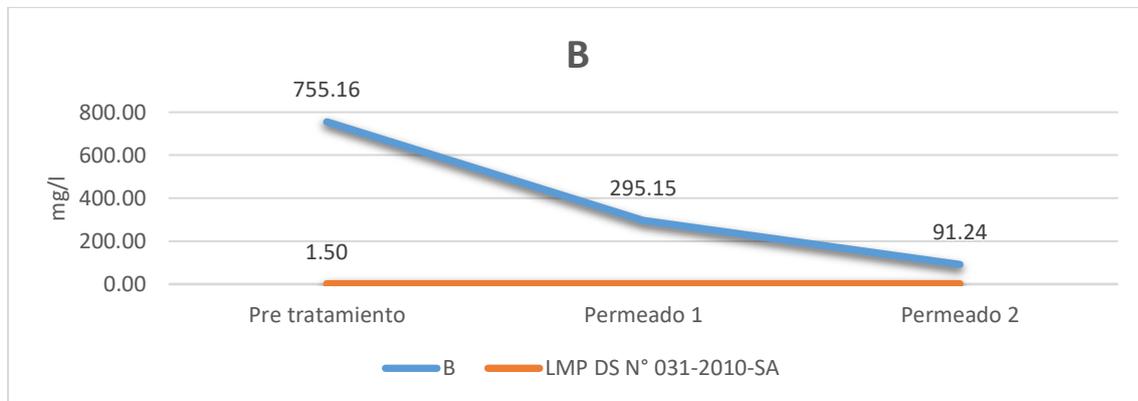
Figura 61*Prueba piloto 3, sulfatos*

Para los niveles de sulfatos se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 791.43 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 0.12 mg/L en el

permeado 2 de OI. Dicho compuesto se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 62

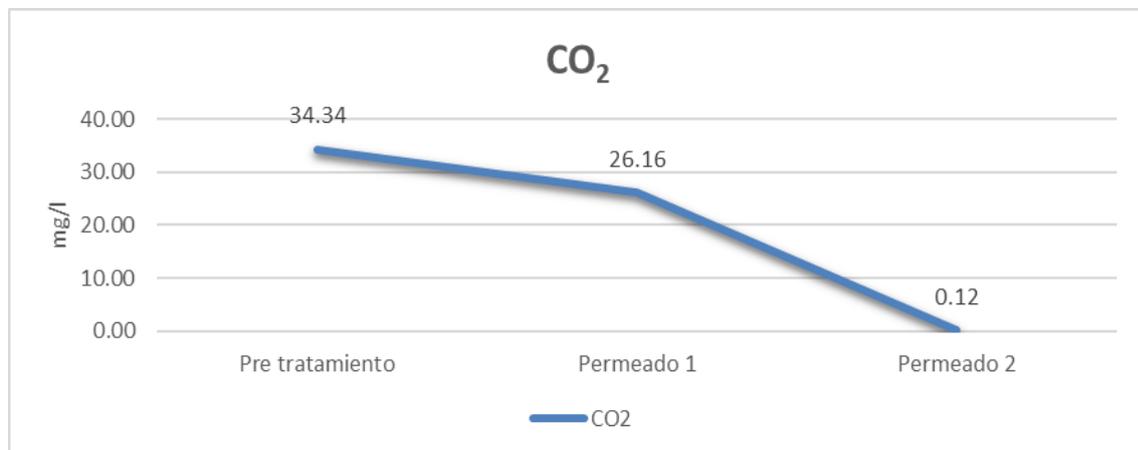
Prueba piloto 3, boro



En cuanto a los niveles de boro se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 755.16 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 91.24 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho elemento excede el LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Figura 63

Prueba piloto 3, CO₂

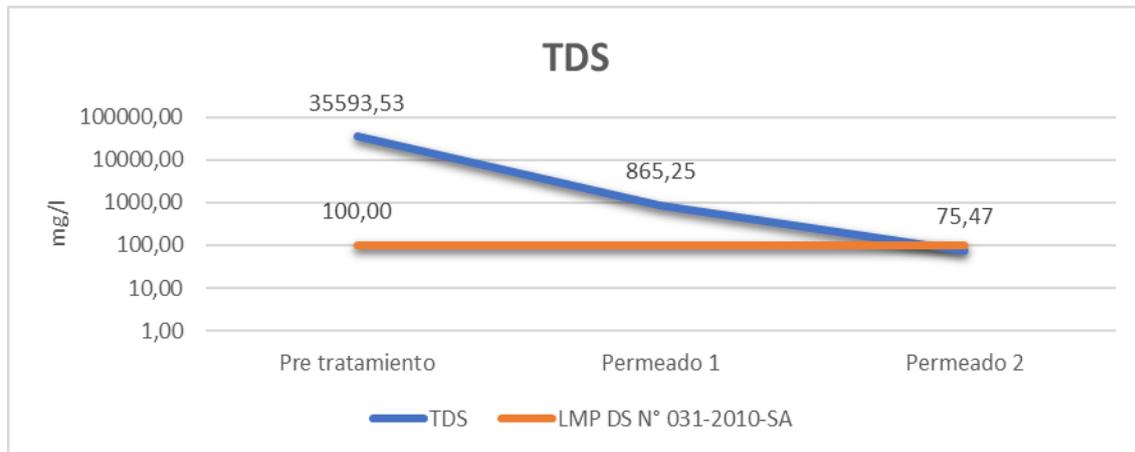


Para los niveles de dióxido de carbono se aprecia que su concentración se reduce de 34.34 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 0.12 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho compuesto no cuenta con un LMP normado.

Figura

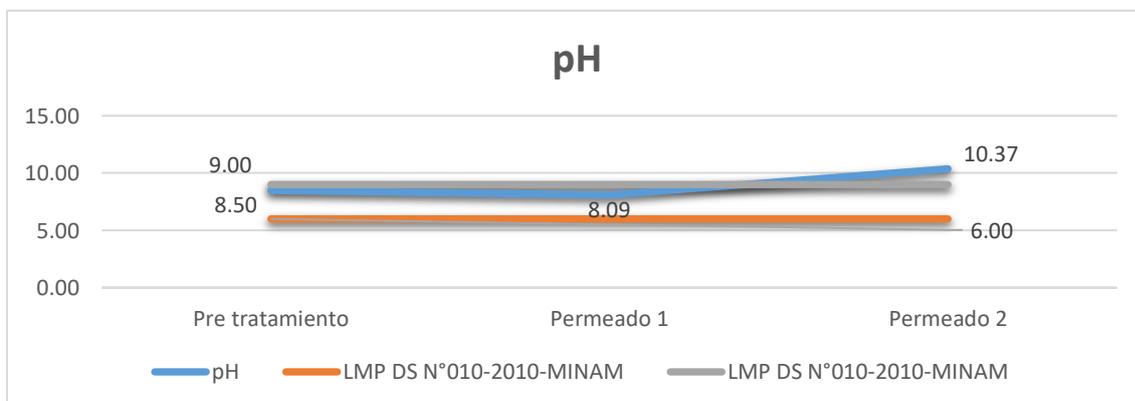
64

Prueba piloto 3, STD



En relación a los niveles de TDS se puede observar que su concentración se reduce considerablemente de 35 593.53 mg/L en el pretratamiento hasta la etapa final de 75.47 mg/L en el permeado 2 de OI. Dicho parámetro se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

Prueba piloto 3, pH



El comportamiento del potencial de hidrógenos varía desde un nivel inicial de 8.5 en la etapa de pretratamiento hasta un valor final de 10.37 en el permeado 2 de OI, encontrándose por encima del Límite Máximo Permisible de acuerdo al D.S N° 010-2010-MINAM.

Figura

65

Prueba piloto 3, conductividad eléctrica



En cuanto a la conductividad eléctrica se puede observar que sus niveles se reducen considerablemente de 71 200 uS/cm en el pretratamiento hasta la etapa final de 141 uS/cm en el permeado 2 de OI. Dicho parámetro se encuentra por debajo del LMP de acuerdo al D.S N° 031-2010-SA.

4.2 Objetivo 2: Obtención del pH óptimo en los tres pilotos

Tabla 11

pH para las tres pruebas piloto

Pruebas piloto	pH inicial	pH óptimo	final	Iones disueltos que no cumplen con el LMP	LMP MINAM DS 010-2010-MINAM	LMP SALUD DS 031-2010-SA
Prueba 1	7.5	9.0		Na: 211.21 mg/l	6 - 9	Na: 200 mg/l B: 1.5 mg/l
Prueba 2	8.0	10.74		B: 84.51 mg/l B: 44.14 mg/l TDS: 607.57 mg/l	6 - 9	pH: 6.5-8.5 B: 1.5 mg/l TDS: 100 mg/l
Prueba 3	8.5	10.37		Na: 292.65 mg/l B: 91.24 mg/l	6 - 9	pH: 6.5-8.5 Na: 200 mg/l B: 1.5 mg/l

Los valores de pH finales, obtenidos después de pasar por cada una de las etapas de pretratamiento, ultrafiltración y ósmosis inversa dieron como resultados para la prueba 1, un valor de 9; para la prueba 2, un valor de 10.74 y para la prueba 3 un valor de 10.37.

En tal sentido, el pH óptimo en las tres pruebas fue de 7.5 (prueba 1), el cual terminó todo el proceso con un pH final de 9, alcanzando de esta manera el nivel que pide la norma dentro de los LMP según el DS 010-2010-MINAM. Los únicos iones disueltos que superaron los LMP para la prueba 1, fueron el NA con 211.21 mg/L y el B con 84.51 mg/L, a diferencia de los demás parámetros que si cumplieron con los LMP según la norma del DS 031-2010-SA.

En la prueba 2, se trabajó con un pH inicial de 8.0, pero se llegó a obtener un pH final de 10.74, sobrepasando el LMP del DS 010-2010-MINAM, el cual no cumplía por lo tanto con las condiciones óptimas para la remoción de iones disueltos y tampoco con la normativa.

En la prueba 3, se trabajó con un pH inicial de 8.5, pero se llegó a obtener un pH final de 10.37, sobrepasando el LMP del DS 010-2010-MINAM, el cual no cumplía por lo tanto con las condiciones óptimas para la remoción de iones disueltos y tampoco con la normativa.

4.3 Objetivo 3: Eficiencias en la remoción de iones disueltos

A continuación, se muestran los resultados de los porcentajes de eficiencias obtenidas para cada uno de los iones disueltos, considerándose desde la etapa del pretratamiento hasta la etapa final del permeado 2.

Tabla 12

Eficiencia de la prueba piloto 1

N.º	Parámetro	Pre tratamiento	Permeado 1	Permeado 2	Eficiencia %
1	As	0.00	0.00	0.00	
2	K	720.60	62.62	17.13	97.62
3	Na	13112.15	521.39	211.21	98.39
4	Mg	99.10	0.39	0.01	99.99
5	Ca	52.50	0.20	0.00	100.00
6	Sr	3.10	0.01	0.00	100.00

N.º	Parámetro	Pre tratamiento	Permeado 1	Permeado 2	Eficiencia %
7	CO ₃	185.58	0.18	22.11	88.09
8	HCO ₃	5000.00	417.56	117.21	97.66
9	Cl	17458.66	613.53	76.09	99.56
10	SO ₄	781.50	3.70	0.07	99.99
11	B	732.58	304.70	84.51	88.46
12	CO ₂	81.84	117.74	0.07	99.91
13	TDS	41600.59	3362.27	922.74	97.78
14	pH	7.50	6.62	9.00	
15	Conductividad	51400.00	862.00	75.00	99.85

Las eficiencias encontradas en la prueba piloto 1, alcanzaron porcentajes que varían entre 88.09% y el 100%. Alcanzando un pH final dentro del LMP de 9.

Tabla 13

Eficiencia de la prueba piloto 2

N.º	Parámetro	Pre tratamiento	Permeado 1	Permeado 2	Eficiencia %
1	As	0.00	0.00	0.00	
2	K	757.00	71.16	18.89	97.50
3	Na	13301.72	507.38	182.35	98.63
4	Mg	88.00	0.34	0.01	99.99
5	Ca	81.10	0.31	0.00	100.00
6	Sr	22.00	0.09	0.00	100.00
7	CO ₃	530.45	1.54	56.57	89.34
8	HCO ₃	2813.00	278.05	12.80	99.54
9	Cl	18224.28	641.27	80.12	99.56
10	SO ₄	732.00	3.28	0.06	99.99
11	B	730.06	273.65	44.14	93.95
12	CO ₂	9.14	6.19	0.00	100.00
13	TDS	40593.53	3060.55	607.57	98.50
14	pH	8.00	7.72	10.74	
15	Conductividad	59200.00	1260.00	141.00	99.76

Las eficiencias encontradas en la prueba piloto 2, alcanzaron porcentajes que varían entre 89.34% y el 100%. Alcanzando un pH final que se encuentra fuera del LMP con un valor de 10.74.

Tabla**14***Eficiencia de la prueba piloto 3*

N.º	Parámetro	Pre tratamiento	Permeado 1	Permeado 2	Eficiencia %
1	As	0.00	0.00	0.00	
2	K	754.00	64.05	17.78	97.64
3	Na	13506.12	497.78	292.65	97.83
4	Mg	79.20	0.33	0.01	99.99
5	Ca	90.10	0.29	0.00	100.00
6	Sr	17.00	0.03	0.00	100.00
7	CO ₃	610.85	1.01	98.57	83.86
8	HCO ₃	3046.12	129.01	92.70	96.96
9	Cl	19254.08	622.37	94.65	99.51
10	SO ₄	791.43	3.91	0.12	99.98
11	B	755.16	295.15	91.24	87.92
12	CO ₂	34.34	26.16	0.12	99.65
13	TDS	35593.53	865.25	75.47	99.79
14	pH	8.50	8.09	10.37	
15	Conductividad	71200.00	1725.00	141.00	99.80

Las eficiencias encontradas en la prueba piloto 3, alcanzaron porcentajes que varían entre 83.86 y el 100%. Alcanzando un pH final que se encuentra fuera del LMP con un valor de 10.37.

4.4 Contratación de hipótesis

4.4.1 Estadística descriptiva

Las muestras fueron analizadas en tres pilotos en los cuales se verifica su comportamiento básico, de lo cual se obtiene:

Tabla 15*Piloto 1, pH inicial 7.5 final 9*

Parámetro	Pre tratamiento	Permeado final	LMP DS N° 031-2010-SA	LMP DS N°010-2010-MINAM
As (mg/l)	0.00	0.00	0.10	0.01
K (mg/l)	720.60	17.13	---	---
Na (mg/l)	13112.15	211.21	200.00	---
Mg (mg/l)	99.10	0.01	---	---
Ca (mg/l)	52.50	0.00	---	---
Sr (mg/l)	3.10	0.00	---	---
CO ₃ (mg/l)	185.58	22.11	---	---
HCO ₃ (mg/l)	5000.00	117.21	---	---
Cl (mg/l)	17458.66	76.09	250.00	---
SO ₄ (mg/l)	781.50	0.07	250.00	---
B (mg/l)	732.58	84.51	1.50	---
CO ₂ (mg/l)	81.84	0.07	---	---
TDS (mg/l)	41600.59	92.74	100.00	---
pH	7.50	9.00	6 - 9	6.5-8.5
Conductividad (uS/cm)	81400.00	175.00	1500.00	---

De lo cual se puede apreciar:

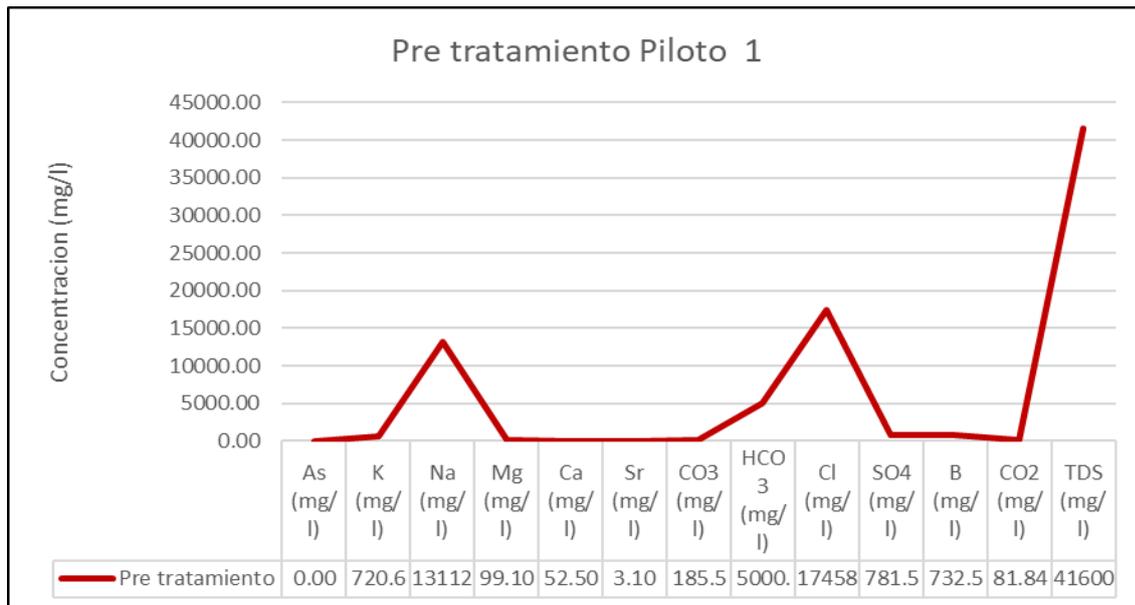
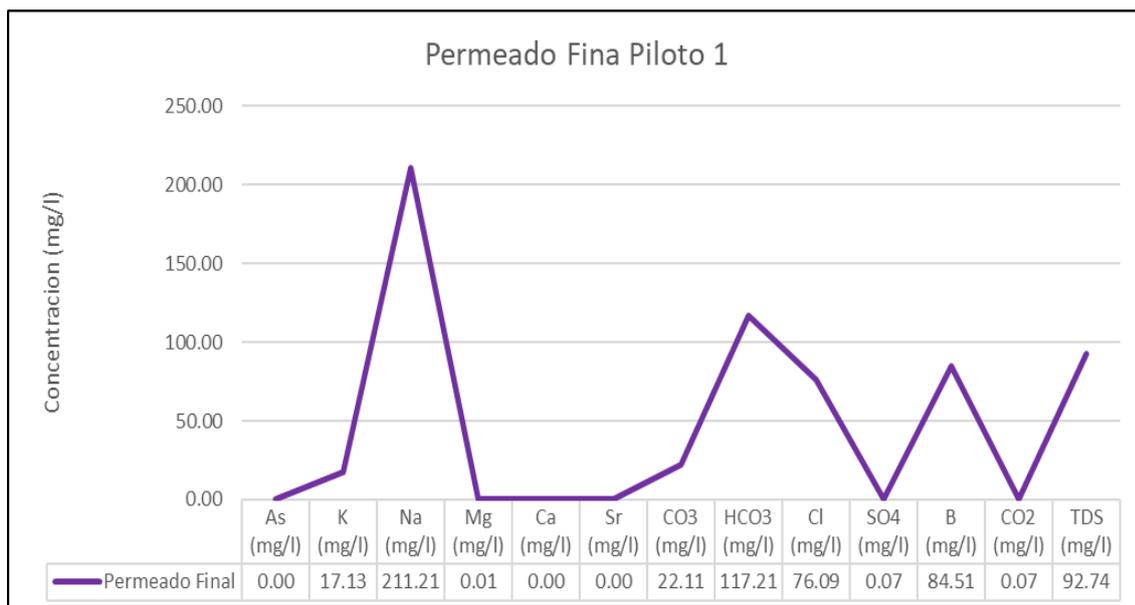
Figura 66*Comportamiento del pretratamiento, piloto 1***Figura 67***Comportamiento final, piloto 1*

Figura 68*Conductividad, piloto 1*

De lo que se concluye que efectivamente existe disminución significativa en los diferentes parámetros analizados.

Tabla 16*Piloto 2, pH inicial 8.0 – pH final 10.74*

Parámetro	Pretratamiento	Permeado Final	LMP DS N° 031-2010-SA	LMP DS N° 010-2010-MINAM
As (mg/l)	0.00	0.00	0.10	0.01
K (mg/l)	757.00	18.89	---	---
Na (mg/l)	13301.72	182.35	200.00	---
Mg (mg/l)	88.00	0.01	---	---
Ca (mg/l)	81.10	0.00	---	---
Sr (mg/l)	22.00	0.00	---	---
CO ₃ (mg/l)	530.45	56.57	---	---
HCO ₃ (mg/l)	2813.00	12.80	---	---
Cl (mg/l)	18224.28	80.12	250.00	---
SO ₄ (mg/l)	732.00	0.06	250.00	---
B (mg/l)	730.06	44.14	1.50	---
CO ₂ (mg/l)	9.14	0.00	---	---
TDS (mg/l)	40593.53	607.57	100.00	---
pH	8.00	10.74	6 - 9	6.5-8.5
Conductividad (uS/cm)	79200.00	1241.00	1500.00	---

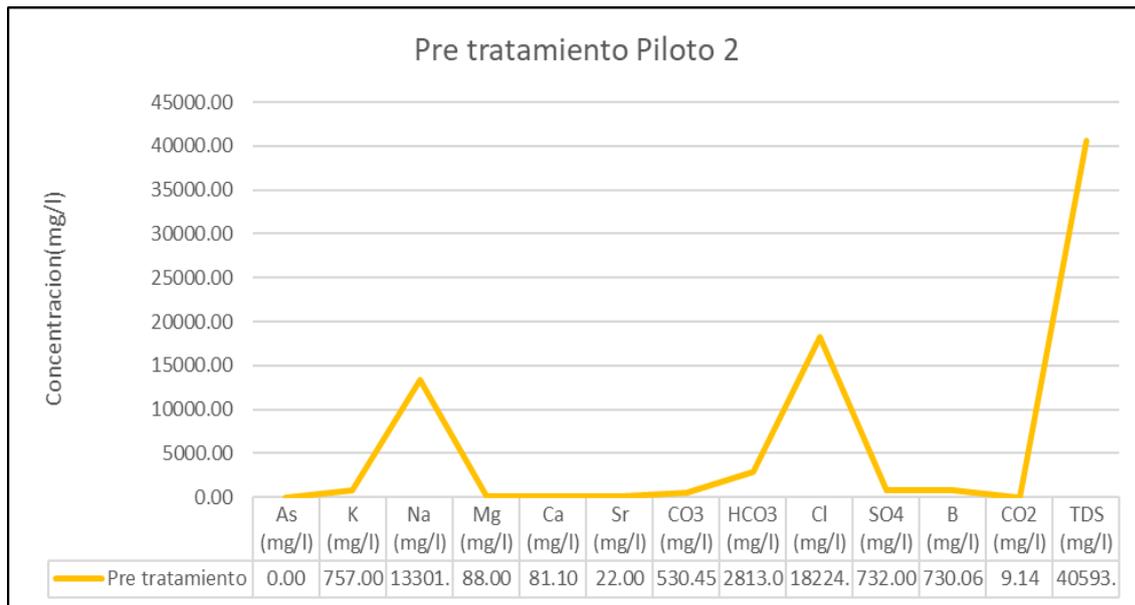
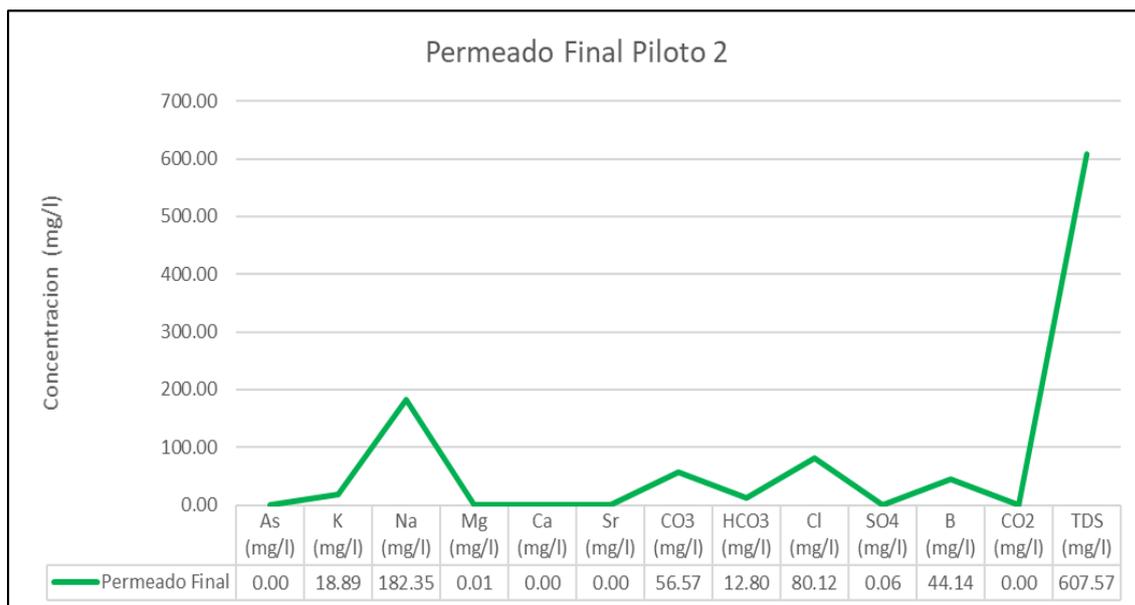
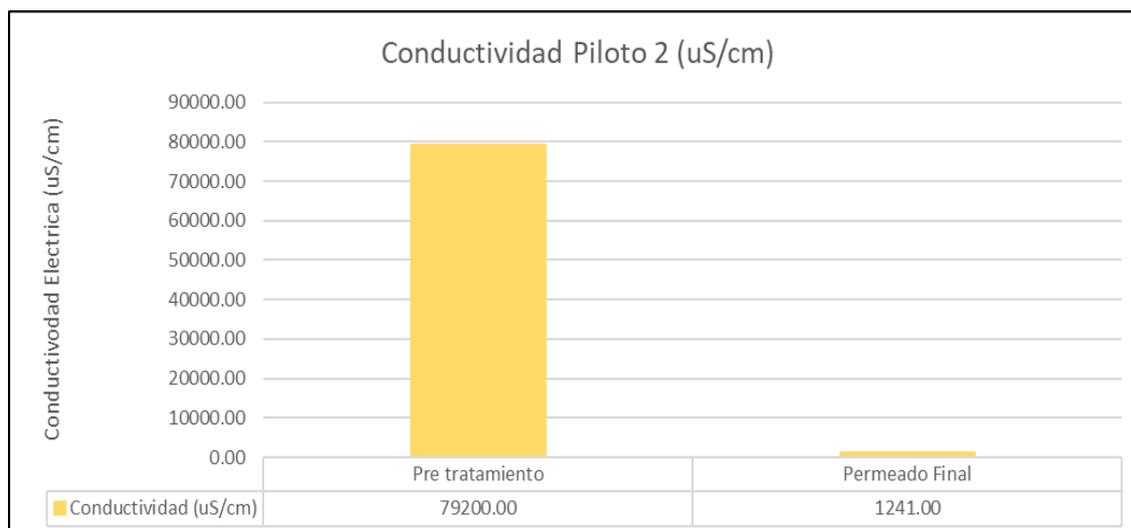
Figura 69*Comportamiento del pretratamiento, piloto 2***Figura 70***Comportamiento final, piloto 2*

Figura 71*Conductividad, piloto 2*

De lo que se concluye que efectivamente existe disminución significativa en los diferentes parámetros analizados.

Tabla 17*pH inicial 8.5 – pH fina 10.37*

Parámetro	Pretratamiento	Permeado Final	LMP DS N° 031-2010-SA	LMP DS N°010-2010-MINAM
As (mg/L)	0.00	0.00		0.01
K (mg/L)	754.00	17.78	---	---
Na (mg/L)	13506.12	292.65	200.00	---
Mg (mg/L)	79.20	0.01	---	---
Ca (mg/L)	90.10	0.00	---	---
Sr (mg/L)	17.00	0.00	---	---
CO ₃ (mg/L)	610.85	98.57	---	---
HCO ₃ (mg/L)	3046.12	92.70	---	---
Cl (mg/L)	19254.08	94.65	250.00	---
SO ₄ (mg/L)	791.43	0.12	250.00	---
B (mg/L)	755.16	91.24	1.50	---
CO ₂ (mg/L)	34.34	0.12	---	---
TDS (mg/L)	35593.53	75.47	100.00	---
pH	8.50	10.37	6 - 9	6.5-8.5
Conductividad (uS/cm)	71200.00	141.00	1500.00	---

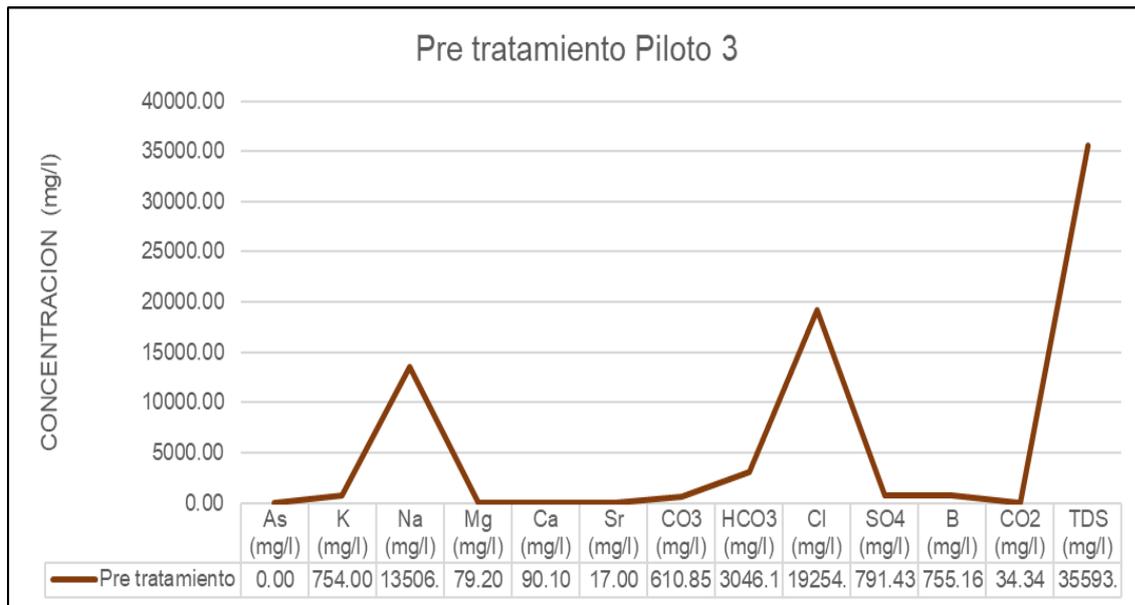
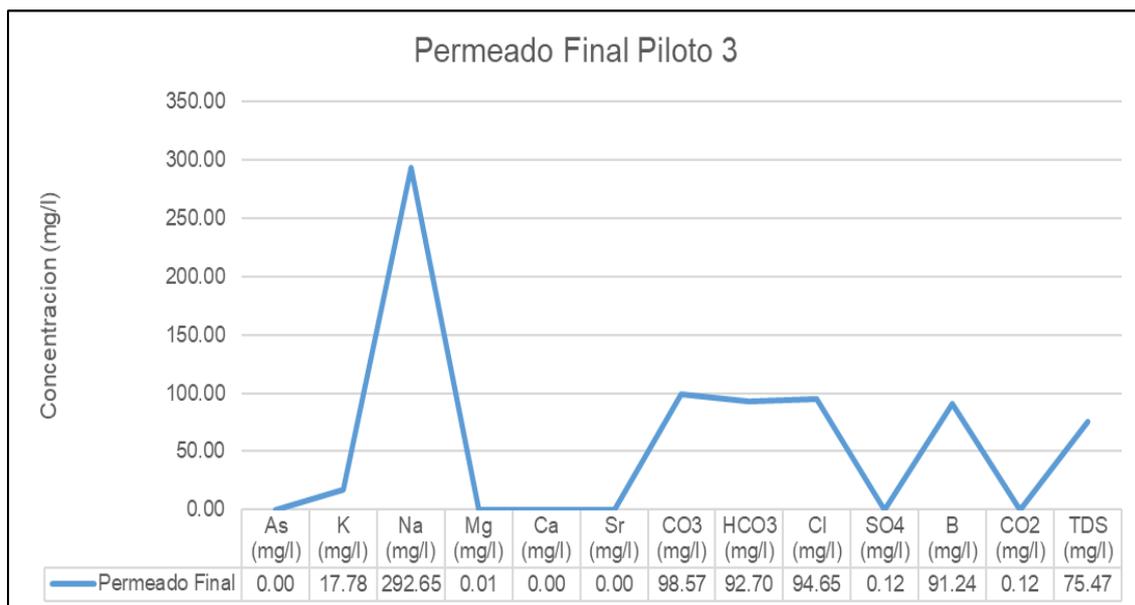
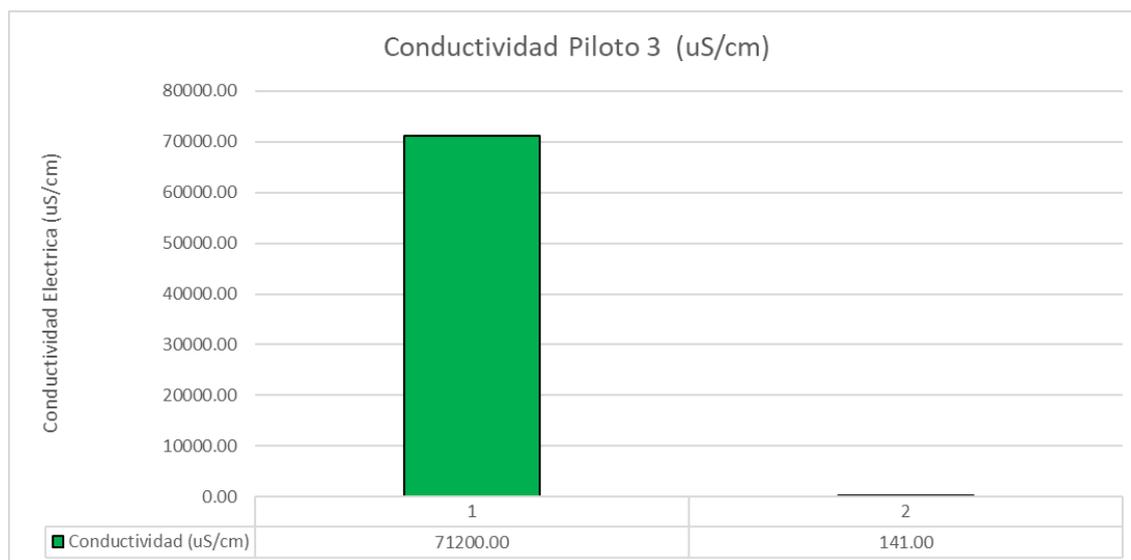
Figura 72*Comportamiento del pretratamiento, piloto 3***Figura 73***Comportamiento fina, piloto 3*

Figura 74*Conductividad, piloto 3*

De lo que se concluye que efectivamente existe disminución significativa en los diferentes parámetros analizados.

Se demuestra según el análisis descriptivo realizado que es más eficiente en eliminar iones metálicos disueltos en el agua tratada el piloto 1 que posee pH inicial de 7.5 y pH final de 9 siendo los pH más eficientes en el que la remoción iones metálicos disueltos es más efectiva.

4.4.2 Análisis inferencial

Para realizar esta prueba de contraste se utilizó la prueba T-student de una muestra por presentarse variables nominales y agrupadas en pilotos específicos de tratamientos la contrastación se realiza de tomando en cuenta las siguientes hipótesis:

Ha: Los parámetros analizados en el agua son removidos significativamente al aplicar el tratamiento.

H0: Los parámetros analizados en el agua no son removidos significativamente al aplicar el tratamiento.

De lo cual aplicando la prueba hipótesis se tiene:

Tabla 18*Prueba de hipótesis*

Prueba Hipótesis T-Student para muestra Piloto1,2,3						
Valor de prueba = 0						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia Superior Inferior	
K (mg/l)	2.345	5	0.066	380.900	-36.58	798.38
Na (mg/l)	2.314	5	0.069	6767.700	-750.72	14286.12
Mg (mg/l)	2.218	5	0.077	44.388	-7.06	95.83
Ca (mg/l)	2.139	5	0.085	37.283	-7.51	82.08
Sr (mg/l)	1.741	5	0.142	7.017	-3.34	17.38
CO ₃ (mg/l)	2.407	5	0.061	250.688	-16.99	518.36
HCO ₃ (mg/l)	1.015	5	0.357	84346.972	-129352.11	298046.06
Cl (mg/l)	2.253	5	0.074	9197.980	-1296.93	19692.89
SO ₄ (mg/l)	2.234	5	0.076	384.197	-57.88	826.28
B (mg/l)	2.725	5	0.042	406.282	23.00	789.56
CO ₂ (mg/l)	1.569	5	0.178	20.918	-13.36	55.20
TDS (mg/l)	2.255	5	0.074	19760.572	-2761.23	42282.38
pH	17.041	5	0.000	9.018	7.66	10.38
Conductividad (uS/cm)	1.593	5	0.172	2562006.833	-1571690.85	6695704.52

De lo que se desprende que para los de iones metálicos y conductividad el valor sig.>0.05, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna por lo cual se concluye que los parámetros analizados en el agua son removidos significativamente al aplicar el tratamiento.

4.4.3 *Contrastación de hipótesis de la investigación*

Para poder contrastar las hipótesis tanto general como específica se contrasta de la Tabla 20.

Tabla 19*Contrastación de hipótesis*

Hipótesis general	Argumentación	Contrastación
Mediante un proceso combinado de ultrafiltración y ósmosis inversa se alcanzará la remoción máxima de iones disueltos en los efluentes generados en la Unidad Minera “Catalina Huanca”	Según el análisis estadístico descriptivo se comprueba que efectivamente existe disminución máxima entre la combinación de tratamientos de ultrafiltración y ósmosis inversa esto ratificado para todos los parámetros por la prueba T de student para una muestra, en la cual se concluye por la sig.>0.05, que todos los parámetros presentan disminución significativa y fundamentalmente el piloto de prueba 1 el cual presenta mayor remoción en los parámetros estudiados	Verdadera
Hipótesis específicas		
Las concentraciones de iones disueltos se encuentran en niveles elevados en los efluentes generados en la Unidad Minera “Catalina Huanca”	Por el análisis estadístico descriptivo se observa que efectivamente los parámetros de iones disueltos se encuentran en niveles elevados.	Verdadera
El nivel de pH optimo a escala piloto se encuentra entre 7.5 y 8.5 para poder alcanzar la máxima remoción de iones de iones disueltos en los efluentes generados en la Unidad Minera “Catalina Huanca”	Por el análisis estadístico descriptivo se observa que donde se presenta mayor remoción de iones disueltos es en el piloto 1 que fluctúa entre el pH 7.5 y pH 9	Verdadera
Los procesos de ósmosis inversa tienen una alta eficiencia en la remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la Unidad Minera “Catalina Huanca”	Por el análisis estadístico descriptivo se observa que existe mayor eficiencia de remoción en proceso de ósmosis inversa, verificable en la prueba hipótesis T de student de una muestra que sostiene que existe diferencia significativa entre el pretratamiento y el permeado final con una sig.>0.05 en cada parámetro ratificando la hipótesis planteada	Verdadera

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

(Varón, 2019) en su trabajo de investigación buscó analizar los sistemas de tratamiento de poco espacio de montaje y adaptar las condiciones de las aguas a tratar dentro de la industria, identificando principios fisicoquímicos, espacio necesario, costos de instalación y operación, entre otros factores, concluyendo que la tecnología más recomendada para las empresas del sector metalmeccánico según las evaluaciones de las tecnologías es la ultrafiltración esto debido a que cuenta con una alta remoción de contaminantes porcentajes superiores al 90%, pero a su vez es más económica que la ósmosis inversa, por lo que está más al alcance del presupuesto que se destina para la instalación y puesta en marcha de la planta de tratamiento. De acuerdo con esto, en la presente investigación se llega a una conclusión que, negando la conclusión del autor, en la cual según los resultados obtenidos se observa que los iones disueltos presentes en los efluentes mineros mediante procesos combinados de ultrafiltración y ósmosis inversa en la UM Catalina Huanca obtuvo una remoción de iones disueltos que varían entre el 83.86% y el 100% de acuerdo a las tres pruebas piloto realizadas.

(Arce, 2013) en su investigación relacionado al pH de trabajo, indica que se obtienen altos rendimientos en la eliminación de Arsénico para pH alcalino en torno a 10, sin embargo, se sabe que en la gran mayoría los resultados trabajados en pH neutro son buenos por encima del 80%. La ultrafiltración junto con la microfiltración son procesos de baja presión donde se retiene únicamente arsénico vinculado a partículas sólidas, en este sentido tenemos que, el arseniato As (V) se adsorbe mejor que el arsenito de As (III) ya que el As (V) está presente en forma aniónica (H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-}), mientras que As (III) está presente como H_3AsO_3 (carga neutra). De

acuerdo con lo antes mencionado, en la presente investigación se confirma la eficiencia que tienen los procesos de ultrafiltración, el cual retiene en esta etapa todas las partículas sólidas, que incluyen las formas de Arsénico (V), en su componente ya mineralizado, motivo por el cual ingresa al proceso de OI 1, con valor de 0.0 mg/L.

(Vera, 2018) en su trabajo de investigación se utilizó la celda de membranas SEPA CF II a escala laboratorio, que permite realizar operaciones de filtración en flujo cruzado con las membranas comerciales de ósmosis inversa (SE, GE Osmonics, obteniéndose un coeficiente de rechazo con la de ósmosis de 98.77 para el Pb^{+2} y 98.30 para el Cd^{+2} . Con la tecnología de biosorción utilizando en el bagazo de caña de azúcar se obtuvieron porcentajes de remoción de 97.76 para el Pb^{+2} y 81.35 para el Cd^{+2} . De acuerdo con esto, en la presente investigación se llega a una conclusión que, afirmando la conclusión del autor, en la cual según los resultados obtenidos se observa que la eficiencia obtenida en la prueba piloto N° 1 de remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la UM Catalina Huanca varían entre 88.09% y el 100%; en la prueba piloto N° 2, varían 89.34% y el 100% y por último en la prueba piloto N°3, varían entre el 83.86% y el 100%. Sin embargo, solo fue la prueba 1 la que obtuvo un pH dentro de los LMP (pH=9) permitiendo así un tratamiento óptimo.

VI. CONCLUSIONES

La remoción del Arsénico (V), a diferencia de los demás iones disueltos en estudio fue removido en la etapa de pretratamiento y ultrafiltración, esto debido a que fue oxidado previamente (As III a As V), alcanzado un estado mineralizado más estable y susceptible a ser retenido en el proceso de ultrafiltración, motivo por el cual ingresa a la etapa de Ósmosis Inversa con una concentración de 0.0 mg/L.

De acuerdo a las tres pruebas piloto realizadas para la remoción de iones disueltos presentes en los efluentes mineros, el cual incluía los procesos combinados de ultrafiltración y ósmosis inversa, se obtuvo una remoción total que varía en el orden del 83.86% al 100%, resultando para los tres casos alcanzar una buena eficiencia.

De las tres pruebas piloto desarrolladas para la presente investigación, la prueba 1 resulto ser la más conveniente para poder ser aplicada en el tratamiento de los efluentes mineros, esto debido a que el pH final no logró exceder el LMP, alcanzando un valor igual a 9, contrario a las otras pruebas que superaron el LMP.

El pH óptimo de inicio de operación fue de 7.5 (prueba 1), con el cual se obtuvo al final de todo el proceso un pH igual a 9 siendo este el más recomendable para alcanzar la máxima remoción de iones disueltos presente en los efluentes mineros, sin embargo, los iones Na con 211.21 mg/L y Boro con 84.51 mg/L, superaron los LMP de acuerdo a la norma del DS 031-2010-SA, contrario a ello las pruebas piloto 2 y 3, que iniciaron con pH de 8 y 8.5, alcanzaron pH finales de 10.37 y 10.74 excediendo el LMP tomado como referencia.

La eficiencia obtenida en la prueba piloto N° 1 de remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la UM Catalina Huanca varían entre 88.09% y el 100%; en la

prueba piloto N° 2, varían 89.34% y el 100% y por último en la prueba piloto N°3, varían entre el 83.86% y el 100%. Sin embargo, solo fue la prueba 1 la que obtuvo un pH dentro de los LMP (pH=9) permitiendo así un tratamiento óptimo.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda desarrollar pruebas con valores de pH diferentes a los realizados en la presente investigación, a fin de ver la posibilidad de poder encontrar resultados más óptimos a diferencia de los hallados en el presente trabajo.

Se recomienda trabajar con LMP de otros países cuando no se cuente con normas nacionales, a fin de poder realizar comparaciones con los resultados en investigaciones futuras.

Es recomendable que los entes encargados de normar en relación a efluentes minero-metalúrgicos como el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) o MINAM, actualicen los LMP, ya que los actuales parámetros son insuficientes para poder realizar una comparación más completa acorde con nuestra realidad.

Es importante tener en cuenta que el pH influye notable y directamente en los porcentajes de remoción de iones disueltos. Las pruebas piloto permiten determinar el balance óptimo entre lo indicado, el punto de operación y el porcentaje de recuperación del sistema, de manera que se brinde el mejor punto de operación en términos de costo-beneficio.

Es recomendable que todas las industrias generadoras de efluentes con iones disueltos utilicen procesos de ultrafiltración, ya que retiene todo tipo de material coloidal e iones mineralizados como el Arsénico (V), garantizando una mayor eficiencia en los procesos posteriores de OI.

La combinación de los métodos de tratamiento: proceso de ultrafiltración y luego OI, nos permiten obtener un efluente que cumple con todos los LMP exigidos por la normatividad vigente (DS. 010-2010-MINAM) por tanto se valida y se recomienda a las empresas mineras la implementación de la OI como método combinado,

eficiente y de fácil operación, para cumplir con todos los parámetros exigidos por la normatividad vigente.

VIII. REFERENCIAS

- Apaza, D. (2015). *Remoción de metales plomo (Pb) y zinc (Zn) de las aguas del Rio Toro Gocha por precipitación alcalina en la ciudad de Juliaca*. http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/1774/Apaza_Asqui_Derly_Willer.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arce, R. (2013). *Opciones tecnológicas para la eliminación de Arsénico dentro del proceso de potabilización de agua: Revisión Bibliográfica y Análisis Bibliométrico*.
- Ayala, M. (2006). Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. *Facultad de Ingeniería*, 53-63.
- Belaire, A. (2017). *Tratamiento de aguas contaminadas con plomo (II) mediante un técnica en continuo de bioadsorción en columna de corcho*.
- Cahuaya, H. (2017). *Eficiencia de la membrana de nanofiltración para obtener salmuera a partir de aguas residuales de regeneración de resinas de intercambio iónico en el distrito de Carabaylo - 2017*.
- Calderón, C. (2012). *Disminución del costo de la remoción de metales en agua para consumo humano mediante el uso de membranas destinadas al ablandamiento del agua*.
- Camarillo, R. (2005). *Separación selectiva de metales pesados en efluentes industriales mediante tecnología PSU*.
- Contreras, S. y Gutiérrez, M. (2015). *Remoción de Plomo de las aguas del efluente Minero de Yauli La Oroya utilizando el coagulante de Maguey (Agave Americana L.) a nivel de laboratorio*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3730/Contreras%20Sanabria-Gutierrez%20Mayta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Delgado, Y. (2018). *Efecto del flujo volumétrico y variación de presión sobre el porcentaje de sílice en el permeado durante el proceso de ósmosis inversa de agua de pozo de la empresa Agrolmos S.A.*
- Echegaray, R. (2018). *Reducción del manganeso con el método de reducción- alcalinización en las aguas contaminadas por los procesos mineros en la provincia de Huaral 2017*. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/5017/1/IV_FIN_107_TE_Echegaray_Contreras_2018.pdf
- Flores, J. (s.f.). *Eficiencia de una membrana de polipropileno modificada con quitosano en la remoción de iones metálicos Ca^{+2} , Cu^{+2} , Cd^{+2} y Pb^{+2}* .

- Gamarra, R. (2015). *Eficacia de la Tecnología de membranas para convertir efluentes mineros, en aguas para riego.*
- Gamarra, R. (2015). *Eficacia de la tecnología de membranas para convertir efluentes mineros, en aguas para riego.* https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2777/MAS_GAA_022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Guizard, C. (1999). *Técnicas membranas de filtración de líquidos.*
- Guizard, C. (1999). *Técnicas membranas de Filtración de Líquidos.* Mérida, Venezuela. <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S451B.pdf>
- INDITEX. (2015). *Filtración en membrana y ósmosis inversa.*
- Instituto Nacional de Salud. (2019). *Tecnología para la recuperación de agua contaminada con metales pesados: plomo, cadmio, mercurio y arsénico.*
- Izquierdo, M. (2010). *Eliminación del Metales Pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso.* <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/52130/izquierdo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lara, J. (2002). *Eliminación de nutrientes mediante procesos de membrana.*
- Lezcano, D. (2013). *Efecto de la variación del porcentaje de recuperación sobre el contenido de sílice en el permeado y rechazo RO.*
- Litter, M. (s.f.). *Remoción de contaminantes metálicos.* San Martín, Argentina.
- Ministerio de Salud. (2011). *Reglamento de calidad del agua para consumo humano.*
- Moreno, D. (2015). *Control predictivo generalizado multivariable de un bastidor de ósmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar.*
- Nidia, G. (2020). *Compósitos en estado hidrogel con aplicación en la adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, pp. 1-13.
- Ramos, F. (2018). *Desalinización del Agua de Mar para uso agrícola, Chilca 2018.*
- Ricardo, L. (2010). *Tratamientos avanzados para aguas residuales industriales. Semillas Ambientales*, pp.1-4.
- Soledad, M. (2020). *Remoción de metales pesados de efluentes líquidos industriales utilizando residuos de biomasa como bioadsorbentes e inmovilización en matrices cerámicas.*

https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/4848/Tesis%20completa_Romano%20Melisa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Trejo, R. (2008). *Investigación sobre eliminación de sales metálicas por procedimientos avanzados*. http://oa.upm.es/1236/1/RADAMES_TREJO_VALENCIA_A1b.pdf

Varón, A. (2019). *Análisis de tecnologías compactas para el tratamiento de aguas residuales no domésticas en empresas con poca disponibilidad de espacio*.

Vera, L. (2016). Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *Afinidad LXXIII*, pp. 43-49.

Vera, L. (2018). Tecnologías de biosorción y membranas en la eliminación de metales pesados. *Tecnologías y Ciencias del Agua*, pp. 91-102.

Villalobos, W. (2011). *Eliminación de Metales Pesados de Aguas Residuales con Membranas de quitosano*.

IX. ANEXOS

A. LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES: D.S N° 010-2010-MINAM

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE ACTIVIDADES MINERO - METALÚRGICAS

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales en Suspensión	en mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

B. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala						
<p>Problema general ¿Cómo se podrá aplicar una remoción de iones disueltos en efluentes mineros por procesos combinados de ultrafiltración y ósmosis inversa en la unidad minera Catalina Huanca?</p> <p>Problemas Específicos 1. ¿Cuál será la concentración de iones disueltos del efluente de mina a la salida de la etapa de pretratamiento e inicio del proceso por ósmosis inversa de la unidad minera Catalina Huanca? 2. ¿Cuál será el pH óptimo del efluente de mina a escala piloto de manera que se alcance la máxima remoción de iones disueltos generados en la unidad minera Catalina Huanca? 3. ¿Cuál será la eficiencia del proceso de ósmosis inversa en la remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la unidad minera Catalina Huanca?</p>	<p>Objetivo general Remover los iones disueltos presentes en los efluentes mineros mediante procesos combinados de ultrafiltración y ósmosis inversa en la unidad minera Catalina Huanca.</p> <p>Objetivos Específicos 1. Determinar las concentraciones de iones disueltos del efluente de mina a la salida del proceso de tratamiento e ingreso a la etapa de ósmosis inversa 1 y 2 de la unidad. 2. Determinar el pH óptimo del efluente de mina a escala piloto a fin de alcanzar la máxima remoción de iones disueltos generados en la unidad minera Catalina Huanca. 3. Estimar la eficiencia obtenida por procesos de ósmosis inversa en la remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la unidad minera Catalina Huanca.</p>	<p>Hipótesis general Mediante un proceso combinado de ultrafiltración y ósmosis inversa se alcanzará la máxima remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la unidad minera Catalina Huanca.</p> <p>Hipótesis Específicos 1. Las concentraciones de iones disueltos se encuentran en niveles elevados en los efluentes generados a la salida del pretratamiento en la unidad minera Catalina Huanca. 2. El nivel de pH óptimo a escala piloto se encuentra entre 7.5 y 8.5 para poder alcanzar la máxima remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la unidad minera Catalina Huanca. 3. Los procesos de ósmosis inversa tienen una alta eficiencia en la remoción de iones disueltos en los efluentes generados en la unidad minera Catalina Huanca.</p>	<p>Variable Dependiente: Remoción de iones disueltos</p>	<p>Los procesos de remoción de iones consisten en una separación física de los solutos presentes en el agua residual al pasar a través de una membrana selectiva a cierto tipo de iones, dichos procesos pueden ser: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, diálisis y electrodiálisis; los cuales se diferencian gracias al material que constituye la membrana, la naturaleza de la fuerza impulsora, el mecanismo de separación y el tamaño de poro de la membrana (Izquierdo, 2010).</p>	<p>La remoción de iones disueltos será evaluado mediante sus parámetros físicos y químicos como la conductividad eléctrica y pH principalmente, los cuales serán retenidos de acuerdo a sus concentraciones y nivel de solubilidad que estos presenten, expresándose en un rango de eficiencia para cada elemento en particular.</p>	Rendimiento	Eficiencia	%						
			Conc. Inicial				mg/l							
			Conc. Final				mg/l							
			Parámetros Químicos			Na, K, Ca, Mg, CO ₃ , HCO ₃ , Cl, E, Sr, SO ₄ , CO ₂ .	mg/l	Parametros Físicoquímicos	Conductividad	uS/cm				
									pH	Unidad de pH				
									TDS					
			Ultrafiltración			Membrana	g	Variable Independiente : Procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa	<p>La microfiltración y la ósmosis inversa fueron las primeras técnicas desarrolladas a nivel industrial con membranas artificiales. La ultrafiltración y luego la nanofiltración se desarrollaron gracias a los adelantos recientes en la fabricación de nuevas membranas. Estas cuatro técnicas se desarrollan como filtración tangencial, es decir, cuando el líquido a filtrar circula de manera permanente y con cierta velocidad a lo largo de la superficie de la membrana. La velocidad de circulación es por lo tanto, junto con la presión a través de la membrana, uno de los dos parámetros importantes en la operación de una planta de filtración por membrana (Guizard, 1999).</p>	<p>Los procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa permitirán retener los iones disueltos mediante el uso de filtros y membranas, los cuales presentarán un nivel de presión adecuada a fin de que el efluente fluya con cierta fuerza y puedan atravesar los poros que estos presentan.</p>	Ultrafiltración	Presión	Bar	
												Porosidad	nm-um	
												Membrana	g	
											Ósmosis Inversa	Membrana	g	Variable Independiente : Procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa
Porosidad	nm-um													
Membrana	g													