

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Diseño de un sistema descentralizado de ósmosis inversa aplicado a la  
remoción de metales pesados en efluentes mineros

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero de minas**

Presentado por:

Cindy Samanda Goyburo Chávez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022 - 1T

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto lo dedico a mi querida mami que siempre me ha apoyado y velado por mi bienestar, gracias por ser mi mejor ejemplo. Este es nuestro logro.

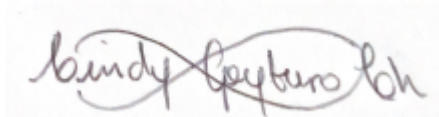
## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, a mi mami Marisol Chávez por ser el motor de mis días y mi inspiración, a mis papás Manuel Bayona y Wellington Goyburo por todo su apoyo y confianza, a mi familia, a mi querido Santiago Gutierrez y a mis amigos por animarme cada vez que sentía que decaía. Quiero agradecer a mis queridos profesores por contribuir en mi desarrollo profesional. A la PhD. Priscila Valverde por toda su paciencia y apoyo, por animarme cada día a mejorar, y compartir conmigo su conocimiento. A la PhD. Samantha Jiménez, al PhD. Leonardo Gutiérrez y al ingeniero Jonathan Méndez por su guía y acompañamiento durante esta investigación. A la PhD Paola Romero que desde el primer día me ayudó a forjar el carácter necesario para esta carrera.

**Cindy Samanda Goyburo Chávez**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Cindy Samanda Goyburo Chávez* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in black ink, reading "Cindy Samanda Goyburo Chávez". The signature is written in a cursive style with some loops and flourishes.

---

Cindy Samanda Goyburo Chávez

## EVALUADORES



**Ph.D. Samantha Jiménez**

PROFESOR DE LA MATERIA



**Ph.D. Priscila Valverde**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Existen diversos métodos para la extracción del oro, entre estos, un método ampliamente utilizado es la cianuración. Sin embargo, los efluentes resultantes de este proceso pueden contener altas concentraciones de cianuro total (CN-) y arsénico (As), que al no ser tratados adecuadamente pueden contaminar los cuerpos hídricos causando graves daños ecológicos y afectar la salud de los usuarios de los ríos. El objetivo de este estudio fue diseñar un sistema descentralizado de ósmosis inversa (OI) aplicado a la remoción de CN- y As en los efluentes generados por una empresa de pequeña minería ubicada en el cantón Camilo Ponce Enríquez. Para este propósito, se caracterizó el efluente minero y se dimensionó la planta de tratamiento mediante el uso del software libre WAVE. La planta piloto de OI fue trasladada y operada en las instalaciones de la empresa minera. El caudal de alimentación de la planta piloto de OI fue el efluente generado por la planta de tratamiento de la empresa minera. En 20 días de experimentación, se recolectaron 52 muestras de agua antes y después de ser tratadas en la planta de OI. Se analizaron 12 muestras representativas en un laboratorio acreditado nacional para cuantificar la eficiencia en la remoción de CN- y As. Como resultado se obtuvo que la eficiencia promedio de remoción de ambos contaminantes en la planta de tratamiento de OI fue de 99.7%, independientemente de la concentración inicial del contaminante. Bajo estas condiciones, el efluente tratado cumplió con el límite máximo permisible para CN- y As  $< 0.1$  mg/L según la normativa ecuatoriana. El costo de planta piloto de OI implementada en este estudio fue de 8949 USD. Este proyecto constituye un aporte importante para la industria minera a pequeña escala, ya que propone un sistema robusto y económico de tratamiento de efluentes que elimina contaminantes con un alto grado de eficiencia, lo que aporta a la protección del recurso hídrico en la zona de estudio. Este proyecto busca alcanzar el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible N° 6 y N° 12, agua limpia y saneamiento mediante una producción y consumo responsable.

**Palabras clave:** Efluentes mineros, cianuro total, arsénico, tratamiento avanzado de agua, contaminación, sistema descentralizado

## **ABSTRACT**

*There are various methods for extracting gold, among these, a widely used method is cyanidation. However, the effluents resulting from this process may contain high concentrations of total cyanide (CN-) and arsenic (As), which, if not properly treated, can contaminate water bodies, causing serious ecological damage and affecting the health of users of the systems. rivers. The objective of this study was to design a decentralized reverse osmosis (RO) system applied to the removal of CN- and As in the effluents generated by a small mining company located in the Camilo Ponce Enríquez canton. For this purpose, the mining effluent was characterized, and the treatment plant was sized using the free software WAVE. The RO pilot plant was moved and operated at the mining company's facilities. The feed flow of the RO pilot plant was the effluent generated by the treatment plant of the mining company. In 20 days of experimentation, 52 water samples were collected before and after being treated at the RO plant. 12 representative samples were analyzed in a national accredited laboratory to quantify the efficiency in the removal of CN- and As. As a result, it was obtained that the average removal efficiency of both contaminants in the RO treatment plant was 99.7%, regardless of the initial concentration of the contaminant. Under these conditions, the treated effluent complied with the maximum permissible limit for CN- and As < 0.1 mg/L according to Ecuadorian regulations. The cost of the RO pilot plant implemented in this study was 8,949 USD. This project constitutes an important contribution for the small-scale mining industry, since it proposes a robust and economical effluent treatment system that eliminates contaminants with a high degree of efficiency, which contributes to the protection of water resources in the study area. This project seeks to achieve compliance with sustainable development goals No. 6 and No. 12, clean water and sanitation through responsible production and consumption.*

**Keywords:** *Mining effluents, total cyanide, arsenic, advanced water treatment, contamination, decentralized system*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema .....	3
1.2 Justificación del problema .....	4
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo General .....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	5
1.4 Marco teórico .....	5
1.4.1 Generalidades de los efluentes mineros .....	5
1.4.2 Problemática ambiental .....	6
1.4.3 Efluentes mineros a nivel de Latinoamérica .....	7
1.4.4 Tratamientos para efluentes mineros .....	8
1.4.5 Caso de estudio planta de tratamiento .....	10
1.4.6 Manejo de efluentes mineros en la planta de tratamiento .....	11
1.4.7 Descripción del proceso de tratamiento para remover cianuro .....	11



1.4.8	Análisis de metales pesados en el efluente minero realizados por la empresa.....	14
1.4.9	Estado del arte del uso de ósmosis inversa en el tratamiento de efluentes mineros.....	14
1.5	Aplicación de tratamiento por ósmosis inversa .....	15
CAPÍTULO 2 .....		18
2.	Metodología.....	18
2.1	Esquema de la planta de tratamiento de ósmosis inversa .....	18
2.2	Medición de iones mayoritarios para el software WAVE .....	20
2.3	Dimensionamiento de la bomba mediante el software WAVE .....	24
2.4	Toma de muestras.....	26
2.4.1	Reconocimiento de campo.....	26
2.5	Transporte a campo y operación de planta de tratamiento de ósmosis inversa.....	27
2.5.1	Recolección de muestras durante experimentación en campo.....	28
2.5.2	Métodos empleados para el análisis de los datos obtenidos en la experimentación en campo .....	28
CAPÍTULO 3 .....		29
3.	Resultados Y ANÁLISIS .....	29
3.1	Resultados del proceso de tratamiento de agua que aplica la empresa minera.....	29
3.2	Esquema de la planta de tratamiento de ósmosis inversa .....	31
3.3	Iones mayoritarios y balance iónico .....	32
3.4	Dimensionamiento de la bomba .....	32
3.5	Trabajo de campo.....	35
3.6	Análisis microbiológico .....	37
3.6.1	Monitoreo diario de turbidez en efluentes.....	38

3.6.2	Monitoreo de pH en efluentes .....	41
3.6.3	Monitoreo de la conductividad eléctrica (CE) en efluentes .....	43
3.6.4	Monitoreo de sólidos disueltos totales en efluentes.....	45
3.7	Análisis de concentraciones de cianuro total y metales pesados .....	46
CAPÍTULO 4 .....		50
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	50
4.1	Conclusiones .....	50
4.2	Recomendaciones.....	52
BIBLIOGRAFÍA .....		53
ANEXOS .....		55
A.	ANEXO A.....	56

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela superior politécnica del litoral
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
LMP	Límite máximo permisible
DAM	Drenaje ácido de minas
AVR	Acidificación-Volatilización-Recuperación
ALD	Drenaje anóxico calizo
SAPS	Sistema de producción sucesiva de alcalinidad
WAD	Weak Acid Disoable
BW	Brackish Water
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
ISE	Internal Ion-Selective Electrode
ISA	Solución de ajuste de fuerza iónica
TOC	Carbono orgánico total
TSS	Sólidos suspendidos totales
SDT	Sólidos suspendidos disueltos
PP	Plástico de polipropileno
CE	Conductividad eléctrica
ORP	Oxidation reduction potencial
pH	Potencial de Hidrógeno
EDTA	Ácido etilendiaminotetraacético

## SIMBOLOGÍA

T	Temperatura
$\mu\text{m}$	Micra
ml	Mililitro
mg	Miligramo
cm	Centímetro
m	Metro
kWh	Kilovatio-hora
Cu	Cobre
Ni	Níquel
Ca	Calcio
K	Potasio
Al	Aluminio
Fe	Hierro
La	Lantano
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
L	Litros
Pb	Plomo
Zn	Zinc
Cd	Cadmio
Co	Cobalto
Hg	Mercurio
As	Arsénico
Sb	Antimonio
H	Hidrógeno
$\text{SO}_4^{2-}$	Sulfatos
$\text{NO}_2$	Nitritos
$\text{NO}_3$	Nitratos
$\text{HCO}_3$	Bicarbonatos

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Proceso inicial de tratamiento de agua producto del beneficio mineral. ....	5
Figura 1.2 Mapa de ubicación de la empresa minera .....	10
Figura 1.3 Mapa de ubicación de la empresa minera .....	12
Figura 1.4 Proceso de tratamiento propio de la empresa para remover cianuro .....	13
Figura 1.5 Diagrama de proceso de ósmosis inversa. ("Ósmosis Inversa   SEFILTRA   Expertos en purificación de fluidos", 2022) .....	16
Figura 1.6 Elementos que componen una membrana de ósmosis Inversa. ("Ósmosis Inversa   SEFILTRA   Expertos en purificación de fluidos", 2022) .....	17
Figura 2.1 Planta de tratamiento de Ósmosis inversa, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Tierra de ESPOL, parte frontal .....	19
Figura 2.2 Planta de tratamiento de Ósmosis inversa, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Tierra de ESPOL, parte posterior .....	19
Figura 2.3 Ingreso de datos iniciales en el software WAVE .....	20
Figura 2.4 Medición de la concentración de calcio mediante el método volumetrico usando como titulante EDTA. ....	22
Figura 2.5 Cubeta HACH 2495402, en el lado izquierdo se muestra el blanco que es la muestra sin alterar, y en lado derecho se observa la cubeta con la muestra y el reactivo. ....	23
Figura 2.6 Análisis de la turbidez en campo mediante el uso del turbidímetro portátil marca HACH.....	27
Figura 3.1 Esquema del sistema de ósmosis inversa para remover elementos contaminantes del efluente minero de la planta de tratamiento .....	31
Figura 3.2 Balance iónico realizado con las concentraciones de iones mayoritarios obtenidos en el Laboratorio de Sanitaria de ESPOL.....	33
Figura 3.3 Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de ósmosis inversa.....	34
Figura 3.4 Configuración de los stages y de las características de membrana utilizada .....	34
Figura 3.5 a) Efluente DR4 con una turbidez alta, no es apta para ingresar a la planta de ósmosis inversa, b) Efluente DR4 con una turbidez aceptable para ingresar al proceso de tratamiento. ....	37

Figura 3.6 a) Análisis de coliformes fecales en muestras de agua del efluente descargado al río y del tanque 3 de carbón activado y b) análisis de coliformes totales en muestras de agua del efluente descargado al río y del tanque 3 de carbón activado. ....	38
Figura 3.7 Turbidez promedio del efluente antes y después de ser tratado en la planta de tratamiento de ósmosis inversa versus tiempo de monitoreo. ....	41
Figura 3.8 pH del efluente antes y después de ser tratado en la planta de tratamiento de ósmosis inversa versus tiempo de monitoreo. ....	42
Figura 3.9 CE del efluente antes y después de ser tratado en la planta de tratamiento de ósmosis inversa versus tiempo de monitoreo. ....	43
Figura 3.10 SDT del efluente antes y después de ser tratado en la planta de tratamiento de ósmosis inversa versus tiempo de monitoreo. ....	45
Figura A.1 Reporte generado por el programa WAVE .....	56
Figura A.2 Anexo 1 TULSMA, límite de concentraciones para descargas a cuerpos de agua dulce. ....	57
Figura A.3 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra Drenaje de río torre 4. ....	58
Figura A.4 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra E17 .....	59
Figura A.5 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra S17 .....	60
Figura A.6 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra E18 .....	61
Figura A.7 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra S18 .....	62
Figura A.8 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra E19 .....	63
Figura A.9 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra S19 .....	64
Figura A.10 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra E20 .....	65

Figura A.11 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec,  
muestra S20 ..... 66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características principales del impacto generado por las aguas ácidas de mina (Zevallos, 2016) .....	6
Tabla 1.2 Resultado del análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec a la empresa minera.....	14
Tabla 2.1 Parámetros necesarios para el agua de alimentación.....	25
Tabla 2.2 Datos para la simulación de ósmosis inversa ingresados en el software WAVE.....	25
Tabla 2.3 Especificaciones de la membrana BW30-4040. ....	26
Tabla 3.1 Variación del pH durante el proceso de tratamiento propio de la empresa para la remoción de cianuro .....	30
Tabla 3.2 Resultados de los análisis de iones mayoritarios obtenidos en el Laboratorio de Sanitaria la ESPOL.....	32
Tabla 3.3 Especificaciones más importantes de la membrana BW30-4040 otorgada por el fabricante .....	35
Tabla 3.4 Presión que debe tener la bomba multietapas para que se genere el proceso de ósmosis inversa.....	35
Tabla 3.5 Resultado de los parámetros inestables tomados durante el reconcomiendo de campo en la empresa minera .....	36
Tabla 3.6 Monitoreo inicial de turbidez durante 30 minutos para verificar la variación de la turbidez durante este tiempo.....	38
Tabla 3.7 Monitoreo diario de la turbidez cada 10 minutos durante el funcionamiento de la planta de ósmosis inversa.....	40
Tabla 3.8 Resumen de iones mayoritarios analizados en el laboratorio de Sanitaria de ESPOL, en muestras de agua escogidas aleatoriamente. ....	44
Tabla 3.9 Resultados del análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec a la empresa minera en el año 2020. ....	46
Tabla 3.10 Resultados del análisis de cianuro total en el efluente de entrada y salida a la planta de ósmosis inversa realizado por el laboratorio GRUENTEC, N° SAE LEN 05-006 .....	47



Tabla 3.11 Resultados de los análisis de cianuro total en los efluentes de entrada y salida a la planta de tratamiento de ósmosis inversa por el laboratorio GRUENTEC, con acreditación N° SAE LEN 05-006.....	48
Tabla 3.12 Resultados de los análisis de metales pesados realizados por el laboratorio acreditado Elicrom.....	48
Tabla 3.13 Resultados de los análisis de arsénico en los efluentes de entrada y salida a la planta de tratamiento de ósmosis inversa por el laboratorio GRUENTEC, con acreditación N° SAE LEN 05-006. ....	49

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Los efluentes mineros se generan por varios procesos que ocurren durante el procesamiento del mineral y el drenaje pluvial. Estos efluentes pueden ser el resultado de ácidos del proceso de flujo, aguas de lavado, flotación y concentraciones residuales, lixiviación del agua y de los lavadores de gas y de refinación. Dependiendo de las concentraciones que contenga el efluente, pueden ser considerados altamente contaminantes, dado que pueden transportar elementos potencialmente tóxicos (Vendrell-Puigmitja et al., 2020).

Los efluentes mineros del tipo ácido, denominados como drenaje ácido de minas (DAM) son uno de los problemas ambientales más serios a los que se enfrenta la industria minera. El DAM se genera por el proceso de oxidación de los minerales sulfurosos que quedan expuestos al contacto con el aire y el agua durante el proceso de extracción de minerales o en los depósitos de residuos mineros (Aduvire, 1991).

Gran parte de la generación de DAM se da en zonas con presencia de pasivos mineros, principalmente en depósitos de residuos abandonados. En países latinoamericanos, existen varias instalaciones mineras abandonadas que no han recibido un correcto cierre de minas. Algunos ejemplos de áreas mineras contaminadas son: Chile, donde actualmente existen 31 faenas mineras abandonadas; México cuenta con aproximadamente 2368 minas abandonadas, y las zonas en donde se encuentra mayor concentración de contaminación es en el centro y el norte del país; Perú cuenta con aproximadamente 8206 minas abandonadas, y en 10 años la cantidad aumentó casi 13 veces más a lo que había en el 2003 (Hazin, 2013).

En Ecuador, la contaminación por metales pesados ha afectado a varias localidades como la provincia de El Oro y Azuay, en donde algunas plantas de procesamiento se encuentran en las orillas de los ríos Calera y Amarillo. En estas plantas se realizan

procesos de reducción del mineral en bruto hasta la fase de lixiviación, en donde, se usa cianuro. Una vez terminado el proceso, los desechos finales son descargados a los ríos, pero con contenidos muy altos de metales pesados o metaloides, provocando grandes impactos ambientales debido a su potencial altamente tóxico (Oviedo-Anchundia et al., 2017).

En la actualidad, existen varios métodos y sistemas para el tratamiento del DAM, como lo son los métodos de tratamiento químico activo y los métodos de tratamiento pasivo, técnicas convencionales como filtración por membrana, nano filtración, ultrafiltración, intercambio iónico, entre otros, de los cuales se han logrado buenos resultados. He et al., 2022, afirma que “académicos canadienses han utilizado celdas de combustible microbianas y electrocoagulación, chlorella y otros métodos para tratar efluentes ácidos de minas”. Otro método existente para tratar el DAM es el proceso de ósmosis inversa, el cual muchas industrias lo ven como un medio viable para disminuir la contaminación, “la aplicación es económicamente atractiva porque tanto el agua procesada como el flujo concentrado son productos valiosos que pueden ser reutilizados, eliminando la necesidad de desviar el desecho a una instalación municipal de aguas residuales” (Bódalo-Santoyo et al., 2003).

Entre los ejemplos de buenas prácticas en la gestión de los efluentes mineros tenemos: en Colorado - Estados Unidos, el agua sobrante de la actividad minera se recoge en un solo punto para ser tratada, monitoreada, reciclada o reincorporada al sistema hídrico con condiciones mejores o iguales a las que tenía inicialmente; en la ciudad de Zacatecas - México, para facilitar la extracción de minerales y proteger el recurso hídrico se aplican técnicas de bombeo preventivo de aguas subterráneas, otro ejemplo de buena práctica es el trabajo de recuperación de humedales mineros con el fin de proteger y preservar la biodiversidad (Velásquez, 2012). Por lo tanto, es preciso aplicar estos métodos de tratamiento buscando la forma de optimizar la mayor cantidad de variables que se involucran en un sistema de mejoramiento de la calidad de agua, permitiendo que las empresas mineras puedan devolver al ambiente el agua tratada y consentir a la comunidad de tener acceso a un agua limpia y libre de agentes tóxicos.

Este proyecto se enfoca en una empresa minera ubicada en la provincia de Azuay, cantón Camilo Ponce Enríquez, la cual realiza procesos de elución, refinación, fundición y tratamiento de efluentes mineros en su planta de beneficio mineral. La empresa realiza la extracción de oro mediante el proceso de cianuración y cuenta con una planta de tratamiento para la detoxificación del efluente cianurado, sin embargo, se encontró altas concentraciones de cianuro total y arsénico en el efluente que es descargado al río.

### **1.1 Descripción del problema**

La industria minera es una de las principales fuentes de ingresos económicos de algunos países. Sin embargo, durante los procesos de extracción del mineral se realizan varias actividades como el retiro de grandes volúmenes de tierra, los cuales son sometidos a procesos mecánicos, físicos, químicos y eléctricos con la finalidad de obtener el mineral y subproductos. Para la ejecución de estos procesos y antes de obtener el producto final, es necesario hacer uso de grandes cantidades de agua, las cuales, una vez que finaliza el proceso, quedan cargadas de metales pesados y/o elementos tóxicos altamente nocivos para la salud humana y ambiental, estos residuos son denominados efluentes mineros y representan una de las principales fuentes de contaminación, por lo tanto, deben ser sometidos a un proceso de tratamiento antes de ser descargados a una fuente hídrica.

La empresa minera objeto de estudio, realiza procesos de molienda, cianuración, flotación y refinación en su planta de beneficio. El efluente generado es ubicado en piscinas de decantación y luego sometido a un proceso de tratamiento para remover cianuro, en donde el objetivo es eliminar las concentraciones elevadas de cianuro y otros metales, sin embargo, de acuerdo con los análisis de calidad de agua realizados en el año 2020 el efluente resultante aún presenta concentraciones de cianuro, arsénico, cobre y hierro por encima de límite máximo permisible establecido en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) para la descarga al río. Por lo tanto, es necesario implementar un tratamiento adicional para disminuir la concentración de cianuro y otros contaminantes, manteniendo sus concentraciones por debajo de los límites permisibles.

## **1.2 Justificación del problema**

Los efluentes mineros en su mayoría son de carácter ácido y poseen concentraciones muy elevadas de metales, por lo que deben ser sometidos a un proceso de tratamiento para después ser devuelto a su fuente original o ser reutilizados en los procesos mineros. La planta de beneficio del caso de estudio cuenta con un sistema de tratamiento para remover cianuro, el cual mediante el uso de metabisulfito de sodio logra reducir hasta un 54% la concentración de cianuro, sin embargo, este sigue presentando concentraciones por encima de la normativa TULSMA para descargas al río. En este contexto, el objetivo de este proyecto es diseñar un sistema de tratamiento de ósmosis inversa que sea aplicado a los efluentes antes de la descarga de estos al río, para así eliminar o disminuir las concentraciones de los contaminantes.

Para este propósito, se plantea el diseño de un sistema de tratamiento descentralizado de ósmosis inversa, que asegure que el producto final tratado mantenga concentraciones bajas o nulas de metales pesados como arsénico y cianuro y que su descarga al río no alterará la vida acuática y tampoco cause riesgo para la salud de los habitantes de las comunidades y/o usuarios de los ríos. Una de las ventajas del proceso de ósmosis inversa es que posee la capacidad de seleccionar sustancias con tamaños microscópicos, lo cual le da una gran cantidad de opciones de tratamiento (Caviedes Rubio et al., 2015). Entre otra de las ventajas que posee se encuentran: la desalinización, la separación selectiva, tiene poco consumo energético, lo cual es una de las principales ventajas del proceso de membrana en comparación con otros procesos (Bódalo-Santoyo et al., 2003).

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema descentralizado de ósmosis inversa aplicado a la remoción de contaminantes en efluentes mineros, para cumplir con los parámetros establecidos por las normativas vigente para la calidad del agua.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

1. Identificar las variables y los parámetros necesarios para el diseño de un sistema descentralizado de ósmosis inversa para el tratamiento de efluentes mineros.
2. Caracterizar físico-química y microbiológicamente el efluente que es descargado al río.
3. Remover la concentración de elementos potencialmente tóxicos en descargas mineras mediante el proceso avanzado de tratamiento; ósmosis inversa.
4. Evaluar la eficiencia del proceso de ósmosis inversa en la eliminación de metales pesados en efluentes mineros.

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Generalidades de los efluentes mineros

Los efluentes mineros pueden tener en su composición sustancias tóxicas para el medio ambiente y la salud del ser humano. Los efluentes mineros pueden ser de tipo ácido y básico, siendo más comunes los del tipo ácido, también conocidos como Drenaje Ácido de Minas (DAM), y se origina por la interacción de minerales sulfurosos con el agua y el oxígeno, además de la presencia de bacterias (que actúan como catalizadoras).

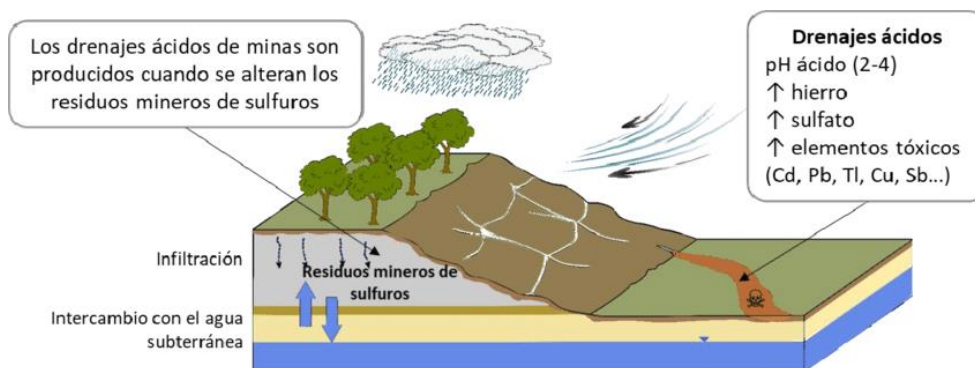


Figura 1.1 Proceso inicial de tratamiento de agua producto del beneficio mineral.

Entre las principales fuentes de DAM tenemos:

- Sitios de acopio de estériles provenientes de los procesos de molienda u otros.
- Desechos rocosos provenientes de la planta chancadora
- Trabajos en la superficie y subterráneos
- Desechos provenientes de embalses de relave, flotación, entre otros.

Los principales focos de drenaje ácidos en labores mineras se dan por: bombeo en minas activas y en las escombreras por los lixiviados; por gravedad en los campamentos abandonados; por las escorrentías tanto en minería a cielo abierto como en las explotaciones subterráneas (Álvarez Días, 2013).

#### 1.4.2 Problemática ambiental

Los efluentes mineros son líquidos que pueden contener coloides en suspensión o en disolución y son potencialmente tóxicos para el ambiente, pueden afectar tanto al suelo como al agua, uno de los principales procesos para el transporte de metales pesados desde la fase sólida es DAM, drenaje ácido de minas, además de los procesos de lixiviación o cianuración (Lillo, 2008).

Otra forma en la cual se puede realizar contaminación por metales pesados es por absorción o coprecipitación, en la cual estos metales se incorporan en el proceso de sedimentación. El DAM puede causar una variación del pH debido al proceso de hidrólisis y oxidación de los sulfuros. A continuación, se resumen las propiedades, las especies químicas y el impacto ambiental que genera el drenaje ácido de minas (Tabla 1.1).

**Tabla 1.1 Características principales del impacto generado por las aguas ácidas de mina**  
(Zevallos Santivañez, 2016).

Propiedad	Especies químicas	Concentración (rangos en solución)	Impacto ambiental
Acidez	H <sup>+</sup>	pH < 4.5	Degradación y muerte de animales y plantas; Pérdida de bicarbonato para los

			organismos fotosintéticos; corrosión de estructuras hechas por el hombre; movilización de iones metálicos; reducción en la calidad del agua potable.
Precipitación de hierro	Fe <sup>3+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Fe (OH) <sub>3</sub> (S)	100 a 1000 mg/l	Asfixia de los organismos bentónicos y la obstrucción de branquias de los peces; decoloración y turbidez en la recepción de agua a medida que aumenta el pH y las sales férricas precipitan, incrustación de hierro en las estructuras hechas por el hombre, reducción de la luz que penetra en la columna de agua.
Metales Pesados y metaloides disueltos	Cu, Pb, Zn, Cd, Co, Ni, Hg, As, Sb	0.01 a 1000 mg/l	Bioacumulación, degradación y muerte de animales y plantas, contaminación de sólidos y sedimentos, reducción en la calidad de agua potable.
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	Ca, Mg, K, La, Fe, Al, Si, Mn	100 a más de 10000 mg/l	Contaminación de sólidos y sedimentos. Reducción en la calidad de agua en reserva. Reducción de la calidad del agua potable

### 1.4.3 Efluentes mineros a nivel de Latinoamérica

De acuerdo con el reporte de minería del Banco central del Ecuador (2017), los sectores que se ven más afectados por la actividad minera son las provincias de Azuay, El Oro y Zamora Chinchipe, ya que, en estos lugares se realizan procesos de extracción y beneficio del mineral. A nivel de Latinoamérica, entre los conflictos por exposición a metales pesados tenemos: los casos de la Mina Natividad y Cerro San Pedro en México y el caso del Proyecto Carbonífero de Carbón del Oriente S.A. en Colombia. En Chile, en el año 2018 ocurrió el derrame de efluentes mineros por parte de la Compañía minera del pacífico y el problema surgió cuando la empresa decidió verter sus desechos mineros en la Ensenada de Chapaco, la empresa recibió una demanda por parte de Organización de Conservación Marina Oceana, y la Superintendencia del Medio Ambiente la acusó de



realizar 20 infracciones, sin embargo, mientras que se apruebe el plan de remediación presentado por la empresa, esta sigue vertiendo sus desechos al mar (Carrere, 2018).

Países como Chile han creado modelos geoquímicos con el fin de predecir la calidad química que se obtiene al final en la solución, para establecer el proceso de remediación que favorezca a las condiciones en las que se encuentra el líquido (Rocco, 2013).

#### **1.4.4 Tratamientos para efluentes mineros**

Entre los tratamientos convencionales para el drenaje ácido de minas existen: tratamientos químicos activos y tratamientos por métodos pasivos.

##### **1.4.4.1 Tratamiento químico activo**

Se agrega sustancias alcalinas, por lo general se usa cal, caliza triturada, sosa cáustica o carbonato sódico con el objetivo de neutralizar el ácido y obtener las condiciones necesarias que permitan la precipitación de los metales pesado (Aduvire, 1991). Entre los tratamientos químicos más comunes tenemos:

- Tratamiento con cal
- Tratamiento con caliza
- Tratamiento con sosa cáustica
- Tratamiento con carbonato sódico
- Tratamiento de aguas ácidas en plantas convencionales y HDS

##### ***Ventajas***

Los tratamientos activos pueden ser aplicados cualquier composición química que posea el efluente y a también a cualquier carga de acidez, además de que logra tratar grandes caudales de agua. El tratamiento con caliza es muy económico debido a que es un material abundante, poco peligroso y no requiere un control estricto en su utilización, produce lodos muy densos que son fáciles de manipular (Aduvire, 1991).

## ***Desventajas***

Entre las desventajas tenemos que generan altos costos de inversión, ya que se deben considerar los costos de los químicos y de los equipos, también se necesita de un mantenimiento constante debido a que un tratamiento químico puede ser a largo plazo, así que durante ese tiempo el responsable tendrá que realizar una revisión periódica y durante el tiempo que dure el tratamiento, por otra parte, la principal limitante es que durante el proceso se genera una lenta oxidación del hierro.

### ***1.4.4.2 Tratamiento por métodos pasivos***

Los tratamientos por métodos pasivos tienen mayor eficacia en el tratamiento de pequeños caudales, en donde primero se realiza la estabilización física y geotécnica de las estructuras mineras, luego prosigue el sellado y la restauración para disminuir las descargas de efluentes (Aduvire, 1991). Entre los métodos tenemos:

- Humedales aerobios
- Humedales anaerobios o balsas orgánicas
- Drenaje anóxico calizo (ALD)
- Drenaje óxico calizo
- Sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS)

## ***Ventajas***

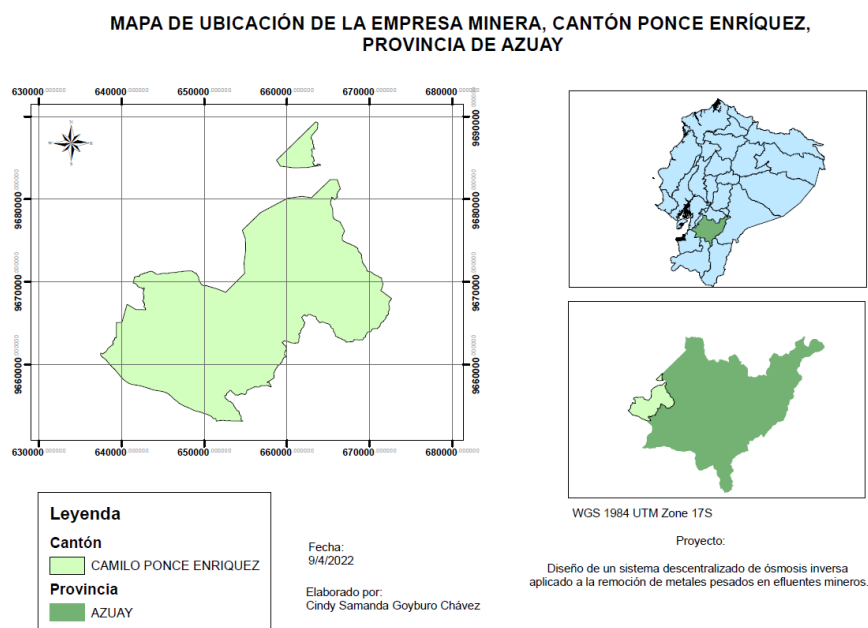
Los tratamientos pasivos requieren un capital de bajo a medio (\$5 000 - \$200 000) con un costo operativo muy bajo, no necesita de una adición constante de reactivos, es aplicable a cargas de ácidos muy bajas, es más apto para minas de carbón y para aquellas que ya no se encuentren realizando labores mineras.

## ***Desventajas***

Entre las desventajas que tienen los tratamientos pasivos, es que se necesitan extensas áreas para su construcción, y esto es un problema en zonas donde el relieve es quebrado, por ejemplo en las zonas mineras de la cordillera, toma mucho tiempo establecer el criterio de diseño y operación ya que poseen complejidad hidrológica y biológica, y además se debe tomar en consideración las estaciones, debido a los cambios climáticos, por ejemplo en la temporada de lluvias, la precipitación cambia la dinámica bioquímica del sistema, las generación de posibles olores y la aparición de mosquitos y bichos (Denegri-Muñoz & Iannacone, 2020).

### 1.4.5 Caso de estudio planta de tratamiento

La empresa minera objeto de estudio está ubicada en la provincia de Azuay en el cantón Camilo Ponce Enríquez y se dedica a la producción de oro. Además, la empresa en su planta de tratamiento ofrece servicios de procesamiento, elución, refinación, fundición y tratamiento de efluentes a empresas del sector de bella rica (Alonso Hidalgo, 2015). En la Figura 1.2 podemos ver la ubicación de la planta, cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia de Azuay.



**Figura 1.2 Mapa de ubicación de la empresa minera**

#### **1.4.6 Manejo de efluentes mineros en la planta de tratamiento**

La empresa realiza los siguientes procesos en su planta de beneficio: molienda, trituración y molienda, cianuración, proceso de elución, flotación, refinación y fundición. En cuanto a los relaves mineros, que son aquellos que contienen concentraciones de químicos muy elevados, la empresa posee una piscina de relaves. El objetivo de estas es que el contaminante se vaya decantando en el fondo y el agua pueda ser recuperada o evaporada (Alonso Hidalgo, 2015).

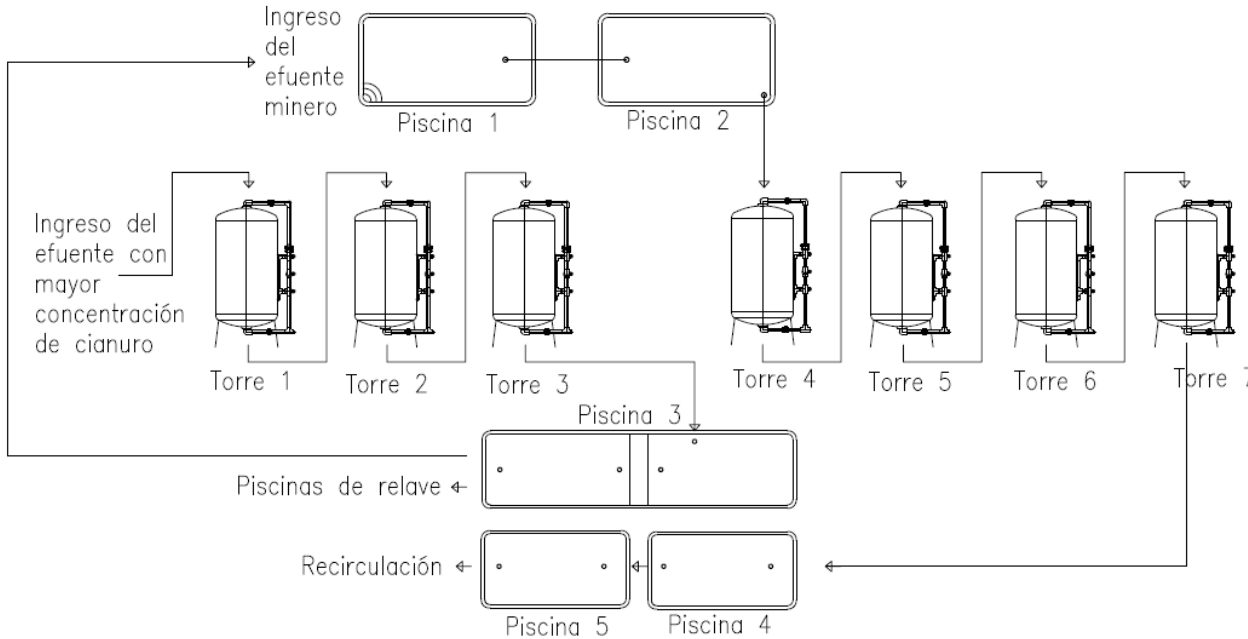
La planta de beneficio cuenta con presas o piscinas de relaves y se encuentran ubicadas en la comunidad San Miguel de Brasil, posee una capacidad de confinamiento de 472 257 toneladas, y se construyó mediante la aprobación del estudio ampliatorio de impacto ambiental. Para tratar las soluciones resultantes, estas son transferidas por rebose a piscinas de tratamiento, las cuales tiene una capacidad de 1 500 metros cúbicos y de foto-degradación natural. El pH promedio tiene un carácter alcalino con valor de 10.5 (Alonso Hidalgo, 2015).

La empresa utilizaba el método AVR (Acidificación-Volatilización-Regeneración), el cual es muy económico, disminuye con rapidez las concentraciones de cianuro, y permite reutilizarlo para otros procesos. El método AVR posee dos etapas, la primera disminuye las concentraciones cianuro en rangos de 300-150ppm, y la segunda etapa mediante el uso del metabisulfito, baja las concentraciones hasta llegar a rangos de entre 30-15ppm a 5-1ppm (Alonso Hidalgo, 2015).

#### **1.4.7 Descripción del proceso de tratamiento para remover cianuro**

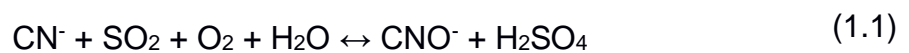
Hoy en día la empresa utiliza el para remover cianuro, el cual es empleado en más de 100 operaciones en todo el mundo que tratan efluentes cianurados, y esto se da debido a su facilidad para remover cianuro total en sola etapa continua y a un costo razonable (Campos, 2015).

En la figura 1.3 se puede observar el proceso de almacenamiento de agua en las piscinas y filtración. El proceso inicia con el producto de la molienda (arena + líquido) donde se genera un efluente que es almacenado en piscinas con una capacidad de 1500 m<sup>3</sup>, piscina 1 y 2, para promover la decantación y disminuir la concentración de sólidos suspendidos. Luego de reposar en las piscinas 1 y 2, el agua es bombeada hacia las torres 4, 5, 6 y 7 de carbón activado con la finalidad de remover el resto de los sólidos suspendidos que no se pudieron sedimentar. Después el agua es bombeada a reposar a un grupo de 4 piscinas menos profundas, donde el agua es distribuida de la siguiente forma: la piscina 3 es utilizada para almacenar líquido con mayor concentración de cianuro, esta agua suele llevarse hasta las relaveras y también ingresa a la piscina 1 y 2 con el fin de que se mezcle con el resto del efluente y disminuya la concentración de cianuro antes de ingresar al proceso de tratamiento para la remoción de cianuro, esta tiene sus propias torres de carbón activado que son la 1, 2 y 3. La piscina 4 contiene el efluente que será la alimentación al proceso de tratamiento propio de la empresa para remover cianuro y la última piscina 5 acumula el agua que será utilizada para recirculación incorporada nuevamente al proceso de producción del oro.

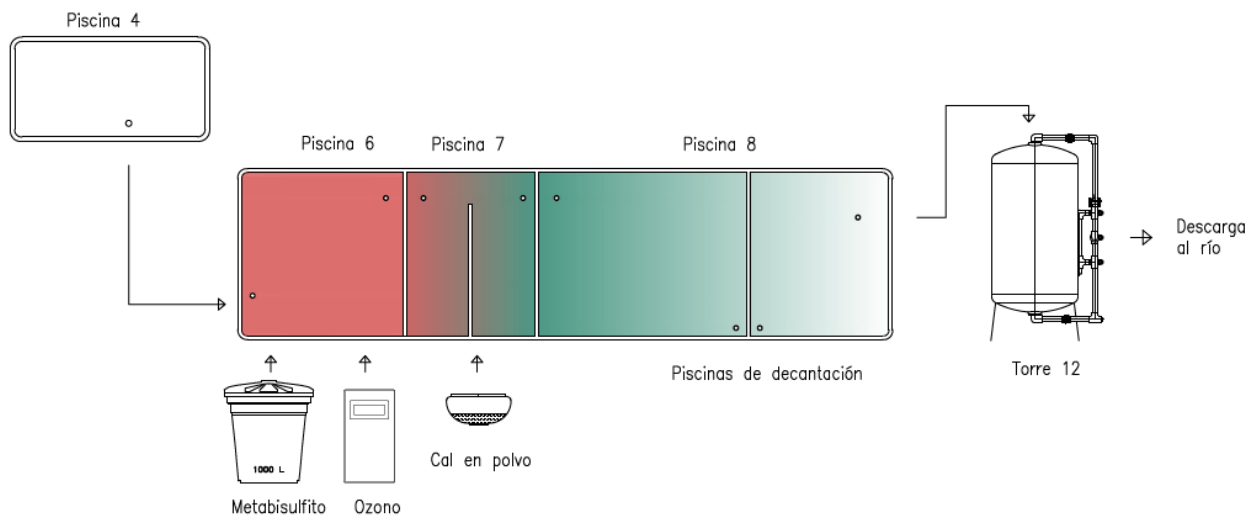


**Figura 1.3 Mapa de ubicación de la empresa minera**

En la Figura 1.4 se observa el proceso de tratamiento propio de la empresa INCO para remover cianuro el cual inicia con el agua almacenada en las piscinas 4 y 5 la cual es bombeada hasta nuevas piscinas. En la piscina 6 (primera del proceso de tratamiento INCO) se adiciona simultáneamente ozono al 60% y metabisulfito de sodio (20,4 L/h) se agrega metabisulfito de sodio dado que posee en su composición dióxido de azufre, el cual es utilizado para oxidar cianuro libre y completos de cianuro metálico Weak Acid Disoable (WAD), como, por ejemplo, complejos de zinc, cobre y níquel.



El efluente pasa a la piscina 7 donde se agrega  $\text{CaOH}_2$  en polvo, cuya función es para contralar el pH debido a la generación de ácido sulfúrico y disminuir la turbidez, finalmente en la piscina 8 se realiza el proceso de fotodegradación natural y de sedimentación durante 15 h. El agua es bombeada hacia las cuatro últimas torres (9, 10, 11, 12) de filtración de carbón activado para finalmente ser descargada al cuerpo de agua superficial.



**Figura 1.4 Proceso de tratamiento propio de la empresa para remover cianuro**

#### **1.4.8 Análisis de metales pesados en el efluente minero realizados por la empresa**

La empresa minera posee una planta de tratamiento de efluentes en la cual aplican el proceso de tratamiento propio de la empresa para la eliminación de metales pesados, antes de descargar el efluente minero al río Siete. Además, analizan la concentración de metales pesados en la parte superior del río y en el punto en el que ellos realizan la descarga, con la finalidad de evaluar el su aporte real de metales al río. Con base en información proporcionada por la empresa sobre los últimos análisis de calidad de agua realizados por el laboratorio acreditado GRUNTEC, los elementos con concentraciones que están por encima de la norma son: cianuro total, plata y cobre. En la Tabla 1.2 podemos corroborar esta información.

**Tabla 1.2 Resultado del análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec a la empresa minera.**

<b>Análisis de muestras realizado por GRUNTEC (2020)</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Medición (mg/L)</b>	<b>LMP Tabla 9 Anexo 1 TULMA</b>
Cianuro Total	17	0.1
Plata	0.22	0.1
Cobre	4.6	1

#### **1.4.9 Estado del arte del uso de ósmosis inversa en el tratamiento de efluentes mineros**

Al momento se han implementado varios métodos para el tratamiento de efluentes en minería, dependiendo de las condiciones de las operaciones y de las necesidades de las empresas mineras. De acuerdo con Samaei et al., 2020, en su investigación desarrollada durante los años 2015 - 2018, para evidenciar la eficiencia del proceso de ósmosis inversa, obtuvo como resultado en el análisis de calidad de agua, que la concentraciones se reducen en un 85%, 96%, 95%, 66%, 82%, 48% y 10% en turbidez, sólidos disueltos totales, antimonio, arsénico, níquel, zinc, y hierro respectivamente, sin embargo, el

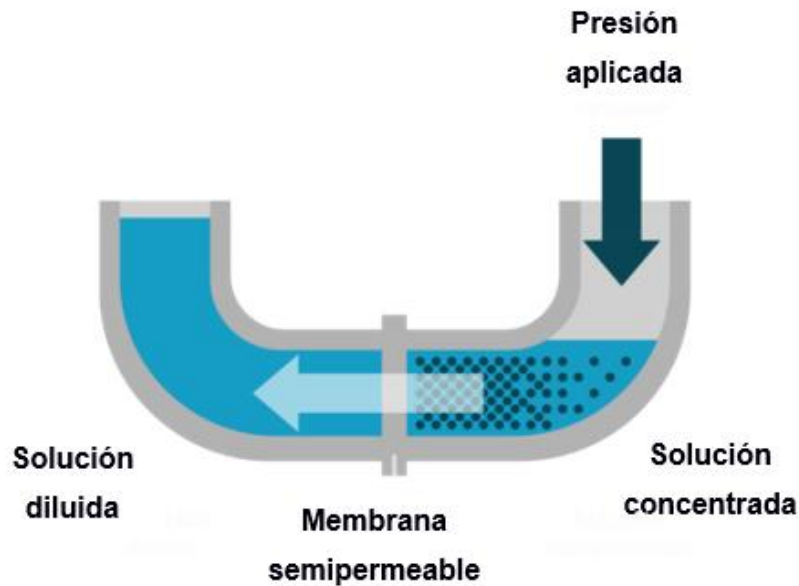
efluente debe poseer un pretratamiento para evitar que la membrana se dañe muy rápido y que disminuya la eficiencia del proceso (Ricci et al., 2015).

Samaei et al. (2020), obtuvo un resultado de eficiencia del proceso de un 55% en la recuperación límite del proceso RO primario. En su investigación hace uso de una membrana sin agregar productos químicos antiincrustantes, es decir, productos químicos que evitan que las sales se depositen en los pequeños poros de la membrana. Para la segunda fase, haciendo uso del antiincrustante y el proceso aumentó su eficiencia a un rango del 65-70%. También analizó el rechazo de elementos por parte de la membrana durante el proceso, entre ellos tenemos metales como plomo, níquel, selenio, estroncio, hierro y bario, dejándolos por debajo del límite de detección, esto se debió a que la membrana que se utilizó fue una Brackish Water (BW30XFR), la cual es usada para agua salobre. También analizó el amoníaco, y encontró que el rechazo de este elemento por parte de la membrana depende del pH que contenga la muestra, un mayor pH de amonio generará la formación de iones de amonio, lo cual provocaría un mayor rechazo por parte de la membrana. En su estudio agregó otros procesos como la electrocoagulación para eliminar elementos resultantes, sin embargo, con el primer proceso y la supresión del pH, el proceso tuvo una recuperación general del agua de alimentación de hasta un 90%.

### **1.5 Aplicación de tratamiento por ósmosis inversa**

El tratamiento de ósmosis inversa como se puede observar en la Figura 1.5 es un proceso en el cual se reduce el caudal aplicado al proceso haciendo uso de una membrana semipermeable, la cual se somete a una fuerza de empuje mayor a la presión osmótica, logrando separar aquellas sustancias que contiene el agua en un lado de la membrana mientras que por otro lado se obtiene una solución baja en sólidos disueltos (Carbotecnia, 2021).



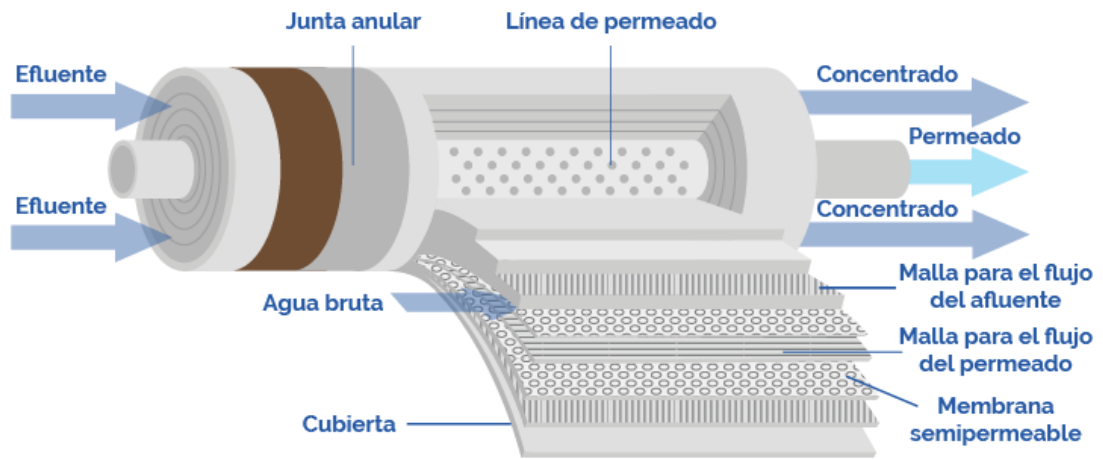


**Figura 1.5 Diagrama de proceso de ósmosis inversa** (*Ósmosis Inversa | SEFILTRA | Expertos En Purificación de Fluidos, n.d.*).

Tiene diversos usos que se detallan a continuación:

- Desalinizar agua de mar y agua salobre
- Separar contaminantes específicos del agua
- Remover materia orgánica
- Suavizar aguas

Para las plantas de tratamiento de ósmosis inversa se necesita un sistema de pretratamiento, un equipo de bombeo de alimentación que contienen las membranas y equipos para dosificar la cantidad de químicos, en el caso de las membranas, estas suelen tener un diámetro de 4 a 8 pulgadas y una longitud entre 40 y 60 pulgadas, estas son enrolladas en forma de espiral y durante el proceso, el agua ingresa a presión, parte de esta agua fluye a través de la membrana hacia el colector de permeado, y el agua con alta concentración de sales pasa por el otro extremo de la membrana. En la Figura 1.6 se indican los componentes de una membrana.



**Figura 1.6** Elementos que componen una membrana de ósmosis Inversa (*Ósmosis Inversa | SEFILTRA | Expertos En Purificación de Fluidos, n.d.*).

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el proceso metodológico para el desarrollo del proyecto integrador. Inicialmente se realizó una visita de campo a la empresa de beneficio mineral para identificar los procesos de tratamiento de agua que la empresa aplica e identificar el efluente con una composición química adecuada para utilizarlo en el proceso de ósmosis inversa. Una vez que fueron identificados los valores de turbidez y carbono orgánico total (TOC) y se verificó que eran adecuados, se procedió a transportar la planta de ósmosis inversa insitu desde ESPOLE hasta la empresa. Durante 20 días se realizó experimentación en campo y un monitoreo diario, en el cual se recolectaron 32 muestras. Se realizó el análisis fisicoquímico de las muestras. Finalmente, se realizó el procesamiento y análisis de los resultados obtenidos.

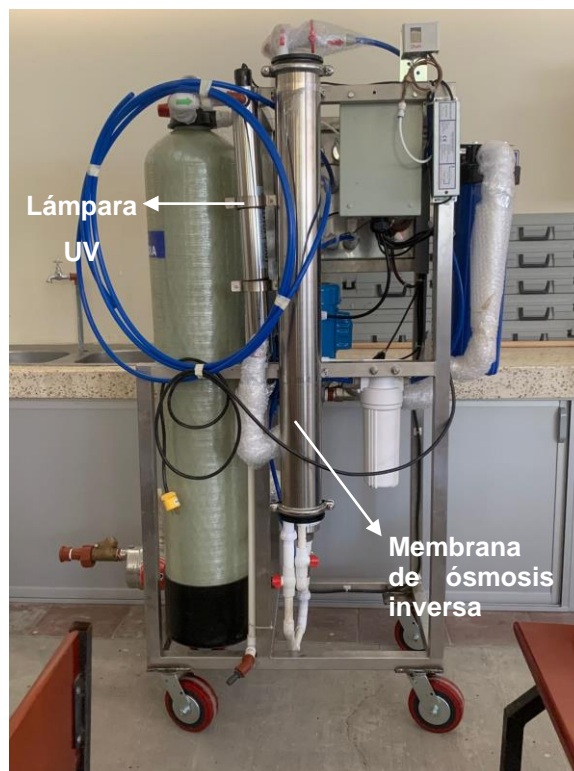
### 2.1 Esquema de la planta de tratamiento de ósmosis inversa

En la Figura 2.1 se puede observar el lado frontal la planta de tratamiento de ósmosis inversa a escala semi-industrial, posee un tablero de control para monitorear TDS, caudal y presión, dos cartuchos de polipropileno, una bomba multietapas, un filtro multimedia y un tanque de almacenamiento de 250L. En la Figura 2.2 se muestra la parte posterior de la planta de tratamiento de ósmosis inversa y se puede observar la lámpara de desinfección ultravioleta y la membrana de ósmosis inversa Brackish Water (BW30-4040).

El efluente producto de la filtración se acumula en un tanque de almacenamiento de 250 L. El agua es bombeada por una bomba centrífuga hacia el filtro multimedia donde disminuye la turbidez, el efluente continúa hacia el proceso de desinfección aplicado a través de una luz ultravioleta y pasa a dos cartuchos de polipropileno de 5 y 1  $\mu\text{m}$  para filtración. Finalmente, el agua es bombeada hacia la membrana de ósmosis inversa Brackish Water (BW30-4040) por una bomba multietapa.



**Figura 2.1** Planta de tratamiento de Ósmosis inversa, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Tierra de ESPOL, parte frontal



**Figura 2.2** Planta de tratamiento de Ósmosis inversa, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Tierra de ESPOL, parte posterior

## 2.2 Medición de iones mayoritarios para el software WAVE

Para el dimensionamiento de la bomba para el proceso de tratamiento de ósmosis inversa, se utilizó el software WAVE versión 1.77, en el cual, se ingresaron las concentraciones de iones mayoritarios, TOC, turbidez, pH, temperatura, TSS, el tipo y el subtipo del efluente, como se muestra en la Figura 2.3. Estos valores corresponden a los valores obtenidos en campo y a los resultados de los laboratorios acreditados.

**Feed Water - Stream 1**

Water Type: Well Water  
Water Sub-type: SDI < 3

Turbidity: 0.81 NTU  
Total Suspended Solids (TSS): 1.20 mg/L  
SDI<sub>15</sub>: 0.00  
Organics (TOC): 2.20 mg/L

Temperature: 10.0 °C (Minimum), 24.0 °C (Design), 40.0 °C (Maximum)  
pH @24.0°C: 6.25, pH @25.0°C: 6.24

Symbol	mg/L	ppm CaCO <sub>3</sub>	meq/L
NH <sub>4</sub>	0.000	0.000	0.000
K	7.000	8.960	0.179
Na	31.500	68.568	1.370
Mg	46.200	190.250	3.802
Ca	304.000	759.182	15.170
Sr	0.000	0.000	0.000
Ba	0.000	0.000	0.000
<b>Total Cations:</b>	<b>388.700</b>		<b>20.521</b>

Symbol	mg/L	ppm CaCO <sub>3</sub>	meq/L
CO <sub>3</sub>	0.019	0.032	0.001
HCO <sub>3</sub>	80.302	65.860	1.316
NO <sub>3</sub>	4.200	3.390	0.068
Cl	3.000	4.235	0.085
F	0.000	0.000	0.000
SO <sub>4</sub>	915.150	953.481	19.053
PO <sub>4</sub>	0.000	0.000	0.000
Br	0.000	0.000	0.000
<b>Total Anions:</b>	<b>1,002.671</b>		<b>20.522</b>

Symbol	mg/L
SiO <sub>2</sub>	0.000
B	0.000
CO <sub>2</sub>	49.646
<b>Total Neutrals:</b>	<b>49.646</b>

Total Dissolved Solids : 1,391.372 mg/L  
Charge Balance: 0.000004 meq/L  
Estimated Conductivity: 2,221.51 µS/cm

Figura 2.3 Ingreso de datos iniciales en el software WAVE

El análisis de iones mayoritarios se realizó en el Laboratorio de Sanitaria de la ESPOL, se analizó: bicarbonatos, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, potasio, sodio, nitritos y nitratos. En cada medición se calibró el equipo con el estándar correspondiente para

verificar el método de medición. A continuación, se describen los métodos analíticos utilizados para los análisis de los iones mayoritarios.

### 2.2.1 Método volumétrico

Para el análisis de la concentración de calcio, magnesio y bicarbonatos, se utilizó el método volumétrico, el cual consiste en tomar un volumen determinado de muestra en un matraz Erlenmeyer y titular con la solución estándar correspondiente hasta que se dé el viraje o cambio de color en la solución; se anota el volumen inicial y el volumen final para obtener el volumen consumido y se lo multiplica por el factor correspondiente. Para obtener la concentración de dureza cálcica se utilizó el método de titulación con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y el método HACH 8222 con un rango de 0 a 25000 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , se tomó una alícuota de 50 mL de muestra, se le agregó 1 mL de hidróxido de potasio, y luego se añadió una almohadilla del indicador de calcio CalVer 2. Para la determinar la dureza cálcica en la muestra, se realiza la ecuación 2.2, en donde se utiliza el volumen consumido por el titulante y se lo multiplica por el factor correspondiente de acuerdo con la cantidad de muestra utilizada, si es que no se realizó ninguna dilución y se tomó una muestra de 50 mL, se realiza lo siguiente:

$$x \text{ ml (vol consum } H_2SO_4) * 20 = 20x \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ CaCO}_3 \quad (2.2)$$

Para la obtención de la concentración de magnesio  $\text{Mg}^{2+}$  se realizó el cálculo por diferencia luego de haber obtenido la dureza total mediante el método HACH 8226, procedimiento similar al de la dureza cálcica con EDTA, con la diferencia de que para este proceso se reemplaza el hidróxido de potasio por 1 mL de dureza de tampón y una almohadilla de ManVer 2. En la Figura 2.4 se muestra el proceso de titulación para obtener la concentración de calcio en el agua.



**Figura 2.4 Medición de la concentración de calcio mediante el método volumétrico usando como titulante EDTA.**

Para la medición de la alcalinidad se realizó una titulación volumétrica con ácido sulfúrico 0.020 N y con los indicadores de fenolftaleína y naranja de metilo. Para la determinar la concentración de alcalinidad total en la muestra, se aplicó la ecuación 2.3.

$$Al_{HCO_3^-} = \frac{V_{consumido} * 50000 * 0.02N}{V_{muestra}} \quad (2.3)$$

### 2.2.2 Espectrofotometría de luz visible

Para el análisis de cloruros, sulfatos, nitritos, nitratos, potasio y hierro, se utilizó el espectrofotómetro marca HACH DR 3900 y cubetas HACH 2495402 de 10 ml. Como se muestra en la Figura 2.5, en una cubeta HACH 2495402 se tomó una alícuota de 10 mL para analizar cloruros mediante el método HACH 8113 y los titulantes: 0.8 mL de tiocianato de mercurio y 0.4 mL de ion férrico. El mismo proceso se realizó para los siguientes análisis con sus respectivos métodos: cloruros (HACH 8113), sulfatos (HACH 8051), nitritos (HACH 8153), nitratos (HACH 8039), potasio (HACH 8049), hierro (HACH



8008) para cada análisis se utilizaron los reactivos correspondientes indicados en los métodos y se verificó la medición con los estándares para cada analito.



**Figura 2.5** Cubeta HACH 2495402, en el lado izquierdo se muestra el blanco que es la muestra sin alterar, y en lado derecho se observa la cubeta con la muestra y el reactivo.

### **2.2.3 Potenciometría**

Para realizar el análisis de sodio se utilizó la sonda IntelliCAL ISENA381 Sodium Internal Ion-Selective Electrode (ISE), la cual se conectó a la multiparamétrica portátil marca HACH. Antes de realizar la medición, se realizó un enjuague con la solución de ajuste de fuerza iónica (ISA) para la sonda y se calibró el equipo con las soluciones estándar de sodio de diferentes concentraciones 1 mg/L, 10 mg/L y 100 mg/L.

### **2.2.4 Análisis de metales pesados, cianuro total y TOC**

El análisis de metales pesados y TOC se realizó en el Laboratorio ELICROM acreditado bajo la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2017, también se encuentra acreditado en SAE-Ensayos, A2LA-Chemical y ALA-Mechanical. El volumen de la muestra recolectada fue de 500 mL almacenada en botella de vidrio ámbar. Para el análisis de metales pesados se tomó una muestra adicional de 1 L en botella de polipropileno la cual fue refrigerada hasta su entrega 24 h después en el laboratorio. Además, se realizó el análisis de As y



cianuro total en el Laboratorio Acreditado GRUNTEC bajo la acreditación N° SAE LEN 05-006. Para la conservación del cianuro total se tomó una muestra en un envase de plástico color café para evitar el contacto con la luz y se añadió 4 gotas hidróxido de potasio (NaOH), mientras que para la conservación de arsénico en otro de plástico se agregó 20 gotas de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) a la muestra, finalmente ambos envases se pusieron en refrigeración dado que no se las entregó al laboratorio el mismo día.

### 2.2.5 Análisis microbiológico

Se analizaron dos muestras de los efluentes mineros tomados durante el reconocimiento de campo para identificar la presencia de coliformes fecales y totales, para este análisis se usaron las placas Petrifilm 3M en el Laboratorio de Sanitaria de la ESPOL. Las muestras fueron recolectadas en recipientes estériles  $\frac{3}{4}$  de su capacidad y refrigeradas. Se inoculó 1 mL de muestra en la placa Petrifilm y se bajó lentamente la película superior evitando la formación de burbujas. Una vez distribuida la muestra en el área de análisis, las placas fueron sometidas a una temperatura de incubación de 37°C para analizar coliformes totales y a 44°C para analizar coliformes fecales durante 24 horas.

### 2.3 Dimensionamiento de la bomba mediante el software WAVE

Para el dimensionamiento de la bomba se utilizó el software WAVE, versión 1.77 del año 2019. Como valor inicial, la aplicación solicitó especificar la cantidad de líquido que se espera obtener como producto o la cantidad del efluente inicial que va a ingresar al sistema, la planta de ósmosis inversa permite obtener 1.5 gal/min, por lo tanto, este valor fue llevado a m<sup>3</sup>/h, como se indica a continuación (ecuación 2.4):

$$\frac{1.3 \text{ gal}}{\text{min}} \times \frac{3.785 \text{ L}}{1 \text{ gal}} \times \frac{0.001 \text{ m}^3}{1 \text{ L}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = \frac{0.31 \text{ m}^3}{\text{h}} \quad (2.4)$$

Por lo tanto, el caudal de salida de la planta fue de 0.31 m<sup>3</sup>/h y 1.24 m<sup>3</sup>/h como caudal de ingreso. Se especificó el tipo de agua que ingresará al sistema, en este caso fue Well Water o agua de pozo. Se estableció un solo flujo de entrada que correspondió al efluente

minero procedente del proceso propio de la empresa para remover cianuro. A continuación, se ingresaron parámetros como turbidez, sólidos suspendidos totales, TOC, pH, y temperatura. En la Tabla 2.1, se muestran las concentraciones óptimas de estos parámetros para evitar el daño de la membrana.

**Tabla 2.1 Parámetros necesarios para el agua de alimentación**

Parámetro	Concentración	Unidad
Turbidez	0.20	NTU
Sólidos totales suspendidos (TSS)	1.20	mg/L
TOC	1.10	mg/L
Temperatura	25	°C
pH	7.30	---

Se procedió a ingresar los valores de cationes y aniones analizados en el efluente de entrada y se realizó el balance iónico. En la siguiente pestaña del software (sección de ósmosis inversa), se estableció la cantidad de etapas del proceso. Los datos que se utilizaron se muestran en la Tabla 2.2 donde se puede observar que el número de pasos es 1 con una sola membrana, este tipo de diseño se dio debido a limitaciones económicas.

**Tabla 2.2 Datos para la simulación de ósmosis inversa ingresados en el software WAVE.**

Etapas	
	Etapas
	<b>Etapas 1</b>
# PV por etapa	1
# Els por etapa	1
Tipo de membrana	BW30-4040

La membrana BW30-4040 es una membrana utilizada para agua salobre, también denominada Brackish Water con un diámetro de 4 in, la cual se somete a una presión de empuje mayor a la presión osmótica, lo que facilita la retención de sustancias contaminantes en la membrana, teniendo como resultado un efluente con menor concentración de contaminantes. A continuación, en la Tabla 2.3 se indican las especificaciones de fábrica de la membrana BW30-4040.

**Tabla 2.3 Especificaciones de la membrana BW30-4040.**

Área activa	7.2 m <sup>2</sup>
Presión	15 bar
Flujo	9.1 m <sup>3</sup> /día
Diámetro	4 in
Recuperación %	18

## **2.4 Toma de muestras**

### **2.4.1 Reconocimiento de campo**

Durante el reconocimiento de campo en la empresa se realizó un recorrido por todas las instalaciones hasta llegar a la planta de tratamiento de efluentes mineros, durante esta salida se identificó el proceso de tratamiento de agua que se realiza antes de descargar el efluente al río. En el capítulo 1.4.5 se describe el proceso de tratamiento para remover cianuro con mayor detalle.

En el reconocimiento de campo se tomaron muestras de dos efluentes, los procedentes de las torres 3 y 4 de carbón activado para determinar turbidez, TOC, iones mayoritarios y metales pesados. La turbidez de un efluente para ingresar a un proceso de ósmosis inversa debe ser menor a 4 NTU y la concentración de TOC debe ser <2 mg/L para evitar el “fouling” o taponamiento de la membrana. La concentración de iones mayoritarios fue necesaria para el dimensionamiento de la bomba multietapa y la concentración de metales pesados para caracterizar las concentraciones iniciales y finales de estos elementos en el efluente a tratar y calcular las eficiencias de remoción de contaminantes.

Para la medición de los parámetros inestables insitu se usó el medidor multiparámetro HACH con la finalidad de monitorear pH durante el proceso de tratamiento, ya que, el agua de mina tiende a ser ácida. La CE fue monitoreada para identificar la cantidad de iones disueltos en el agua y verificar la eficiencia de remoción de sales de la membrana. La temperatura y SDT también fueron monitoreados. Esta multiparamétrica fue calibrada contra estándares de pH de 4.01, 7.00 y 10.01 y para la medición de la turbidez se usó el turbidímetro portátil 2100Q, marca HACH, el cual previamente fue calibrado con los estándares de formazina de 10 NTU, 20 NTU, 100 NTU y 800 NTU. Como se muestra

en la Figura 2.6, se realizó la medición de la turbidez en el efluente de las torres de carbón activado 3 y 4 para asegurar una concentración de turbidez adecuada a la membrana de ósmosis inversa.



**Figura 2.6 Análisis de la turbidez en campo mediante el uso del turbidímetro portátil marca HACH.**

## **2.5 Transporte a campo y operación de planta de tratamiento de ósmosis inversa**

La planta de tratamiento de ósmosis inversa fue transportada e instalada en el área de tratamiento efluentes mineros, dado que en esta zona las condiciones eran favorables para el funcionamiento y cuidado de la planta de tratamiento de ósmosis inversa. Se utilizó una conexión de 220 V y se llenó el tanque de alimentación de 250 L con el efluente minero de la torre #4, la cual corresponde al efluente que se descarga al río. Una vez lleno el tanque para alimentar al proceso de tratamiento, se encendió la alimentación a la planta de tratamiento y luego se encendió la bomba multietapa de ósmosis inversa. Durante la operación de la planta se monitorearon turbidez y parámetros inestables del efluente de entrada durante el tiempo de operación de esta, 30-40 min. Se tomaron

muestras de agua de los efluentes de entrada y salida de la planta durante la experimentación.

### **2.5.1 Recolección de muestras durante experimentación en campo**

Una vez finalizados los 40 minutos de operación de la planta, se recolectaron muestras de agua en tubos Falcon de 50 mL, llenando 40 mL del envase con muestra de agua y se congelaron las muestras. En botellas de vidrio ámbar de 500 mL, se tomaron 400 mL de muestra del tanque de alimentación y 400 mL del permeado con la finalidad de realizar análisis de cianuro total acorde a los procedimientos de muestreo de los laboratorios acreditados. Se recolectó 1 L de muestra en botellas plásticas para analizar iones mayoritarios en el Laboratorio de Sanitaria de la ESPOL. Se midieron además los parámetros inestables descritos anteriormente.

### **2.5.2 Métodos empleados para el análisis de los datos obtenidos en la experimentación en campo**

Una vez finalizados los análisis de laboratorio en las muestras preservadas durante el trabajo de campo, se organizó toda la información mediante el software Excel, también se usó Excel para obtener los porcentajes de eficiencia de remoción de los contaminantes en la planta de tratamiento de ósmosis inversa. Mediante el software Origin v9.8. se realizaron los gráficos para la interpretación de los resultados, por ejemplo, para identificar el comportamiento del pH antes y después del tratamiento con membranas, se utilizó una gráfica de dispersión. Se realizó este proceso para el resto de las variables involucradas en el proceso.

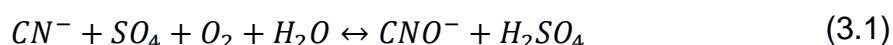
# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del trabajo en campo realizado en la empresa minera, además se muestra el diseño de la planta de tratamiento de ósmosis inversa, el dimensionamiento de la bomba, los análisis realizados en laboratorios, los resultados del monitoreo de parámetros inestables y la eficiencia de remoción de elementos contaminantes del efluente minero.

### 3.1 Resultados del proceso de tratamiento de agua que aplica la empresa minera

La empresa minera aplica un tratamiento de agua para la detoxificación de efluentes cianurados denominado INCO. En este proceso se agrega un componente que es fuente de dióxido de azufre como el metabisulfito de sodio. El dióxido de azufre oxida especies de cianuro, como se puede observar en la Ecuación 3.1:



El valor del pH óptimo para que se realice la reacción debe ser en un rango de 7.5 - 9.5. Sin embargo, el valor medido en campo muestra que el pH del efluente que sirve como alimentación para el proceso de tratamiento es de 5.68, lo cual es una desventaja para el proceso de oxidación del cianuro mostrado en la Ecuación 3.1.

Los iones de tiocianato presentes en el agua también pueden ser oxidados mediante una reacción catalizada por iones de níquel, cobre y cobalto. Se genera la siguiente Ecuación 3.2:



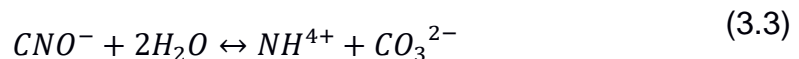
La generación de ácido sulfúrico puede disminuir el pH del efluente tratado con el proceso que aplica la empresa. En campo, se midió una variación del pH como se

muestra en la Tabla 3.1. en donde se evidencia el cambio del pH durante cada proceso de tratamiento que realiza la empresa, sin embargo, el pH de alimentación y el pH de descarga no varían, lo cual es un indicativo que el tratamiento no está funcionando correctamente.

**Tabla 3.1 Variación del pH durante el proceso de tratamiento propio de la empresa para la remoción de cianuro**

pH alimentación	pH piscina 6 metabisulfito	pH piscina 7 cal	pH piscina 8 sedimentación	Descarga al río
5.68	2.01	9.11	8.54	6.05
5.52	3.81	8.74	7.21	5.85
5.51	2.03	8.01	8.04	5.88
6.20	3.45	8.54	8.99	6.01

Además, la descomposición de los iones cianato pueden generar la presencia de carbonatos y amoníaco, siendo el amoníaco peligroso. Este proceso se realiza en la piscina 6 con una capacidad de 30 m<sup>3</sup>.



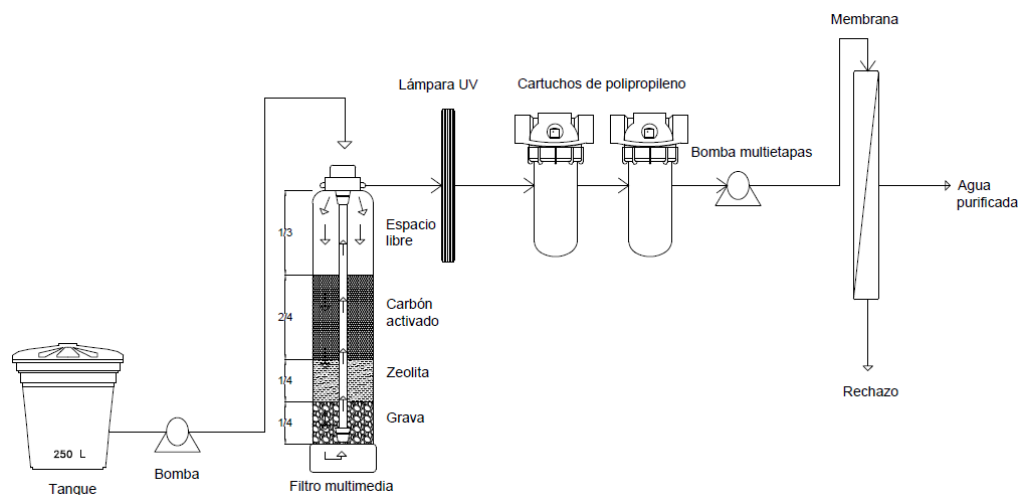
La piscina 7 y 8 tienen capacidades de 30 m<sup>3</sup>, y 60 m<sup>3</sup> respectivamente, la piscina 7 tiene compartimientos en forma de laberinto en donde en el último compartimiento se añade Cal P-24 para alcalinizar la solución y que precipiten y se coagulen los sólidos suspendidos que suelen ser de cobre y hierro. Durante este proceso, se da la fotodegradación natural. Finalmente, el fluido es sedimentado en la piscina 8 y bombeado hacia las cuatro columnas de carbón activado para absorber metales como la plata, el oro y el cobre.

Acorde a los registros medidos en campo, el pH y CE del efluente que ingresa al proceso de tratamiento de agua de la empresa es marginal comparado con el efluente que es descargado al río. Por ejemplo, el efluente de entrada al proceso de tratamiento de agua que realiza la empresa exhibió un pH de 5.62 y CE de 1592 µS/cm; después del tratamiento, el pH fue de 5.61 y la CE de 1539 µS/cm.

### 3.2 Esquema de la planta de tratamiento de ósmosis inversa

El diagrama de la Figura 3.1 se realizó en el software AutoCAD, la planta de tratamiento de ósmosis inversa está conformada por: un tanque de alimentación a la planta de 250 L, una bomba de agua con una presión necesaria para elevar el líquido hasta el filtro multimedia, el cual tiene cuatro secciones, de abajo hacia arriba está compuesto por 1/4 de grava, 1/4 de zeolita, 2/4 de carbón activado y 1/3 de espacio libre. El agua se distribuye en forma de aspersion en el filtro multimedia. También existe en el centro del filtro multimedia un tubo que en su base posee unas ranuras pequeñas por donde se infiltra el agua hasta pasar al siguiente paso. También se utiliza este mecanismo para realizar el retro lavado.

El filtro multimedia permite atrapar sólidos suspendidos, hasta 10  $\mu\text{m}$ . Luego pasa a la lámpara ultravioleta el cual es el método de desinfección utilizado en este sistema de tratamiento. En este proceso se eliminan microorganismos como coliformes, bacterias y virus, sin generar subproductos de desinfección (Wright & Cairns, 1998). El agua desinfectada es bombeada al siguiente paso de filtración, el cual consiste en cartuchos de polipropileno. El primer filtro tiene la capacidad de remover hasta 5  $\mu\text{m}$  de sólidos suspendidos, y en el siguiente filtro se remueven partículas de hasta 1  $\mu\text{m}$ . En la etapa siguiente, el efluente es bombeado por una bomba multietapa hacia la membrana de ósmosis inversa donde se retienen los contaminantes.



**Figura 3.1 Esquema del sistema de ósmosis inversa para remover elementos contaminantes del efluente minero de la planta de tratamiento**



### 3.3 Iones mayoritarios y balance iónico

Para establecer las características de la planta de tratamiento, es importante conocer las concentraciones de iones mayoritarios del efluente a tratar. Por esta razón, se realizó el análisis de estos iones en dos efluentes para identificar el adecuado para la planta de tratamiento de ósmosis inversa, el efluente del tanque 3 (EFT3) y el drenaje al río (DR4), los cuales fueron datos de entrada al software WAVE para realizar el balance iónico de la muestra y obtener la configuración de los elementos del sistema de ósmosis inversa. Se calculó que el error del balance iónico para la muestra EFT3 fue de 0.4% y el error de la muestra DR4 fue de 5.1%; errores menores al 10% son aceptables y aseguran la representatividad de los análisis. En la Tabla 3.2 se resumen las concentraciones medidas de los iones mayoritarios de los efluentes EFT3 y DR4.

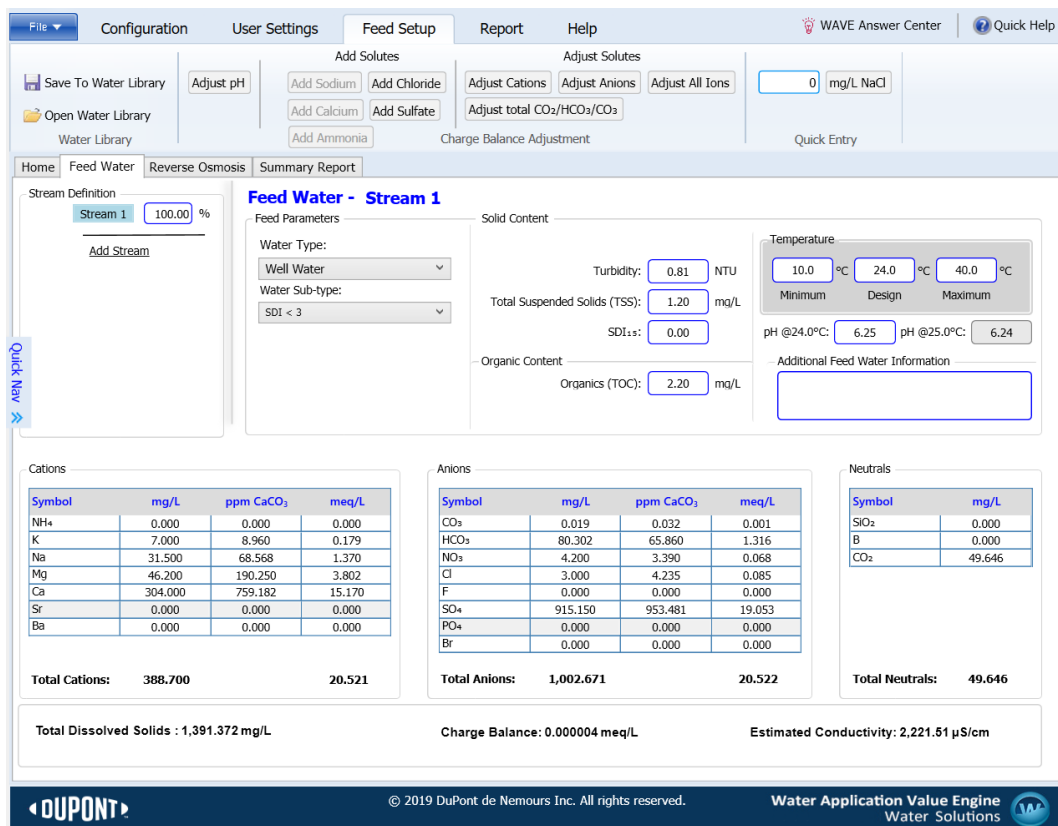
**Tabla 3.2 Resultados de los análisis de iones mayoritarios obtenidos en el Laboratorio de Sanitaria la ESPOL.**

Código Muestras	Parámetros (mg/L)									
	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
EFT3	33.10	305.60	0.34	0.16	6.00	2.50	915.00	3.10	176.00	64.00
DR4	31.50	304.00	0.36	0.22	7.00	4.20	820.00	3.00	46.20	80.00

### 3.4 Dimensionamiento de la bomba

Para el dimensionamiento de la bomba se utilizó el software WAVE, el cual, mediante las concentraciones de iones mayoritarios y parámetros inestables medidos en campo, permite realizar una simulación de la presión que se debe utilizar para realizar el proceso de ósmosis inversa. También se puede obtener el valor de consumo energético del sistema de tratamiento de ósmosis inversa. Se establece el caudal de entrada de 1.24 m<sup>3</sup>/h y el caudal de salida fue de 0.31 m<sup>3</sup>/h. A continuación, se ingresaron en la pestaña Feed Water del software las concentraciones de los iones mayoritarios como se muestra en la Figura 3.2. También, se registró la concentración de turbidez de 0.81 NTU, sólidos suspendidos totales de 1.20 mg/L, pH del agua de 6.25, y concentración de carbono orgánico total de 2.20 mg/L, valores correspondientes a la muestra DR4, debido a que

proviene del efluente que es descargado al río y servirá de alimentación para la planta de ósmosis inversa. Fue necesario realizar el balance iónico para disminuir el error y poder continuar a la siguiente sección en el software, en este caso se realizó el bance iónico añadiendo sulfatos.



**Figura 3.2 Balance iónico realizado con las concentraciones de iones mayoritarios obtenidos en el Laboratorio de Sanitaria de ESPOL.**

En la Figura 3.3 se observa la configuración del sistema de ósmosis inversa más simple posible. La temperatura de diseño fue de 24°C, con un factor de flujo de 1.00 debido a que la membrana de ósmosis inversa no ha sido utilizada con anterioridad y no ha existido desgaste de esta. El porcentaje de recuperación del permeado calculado fue del 18%, a continuación, se muestra la Ecuación 3.4 utilizada:

$$\gamma = \frac{Q_p}{Q_f} * 100\% \quad (3.4)$$

Donde,

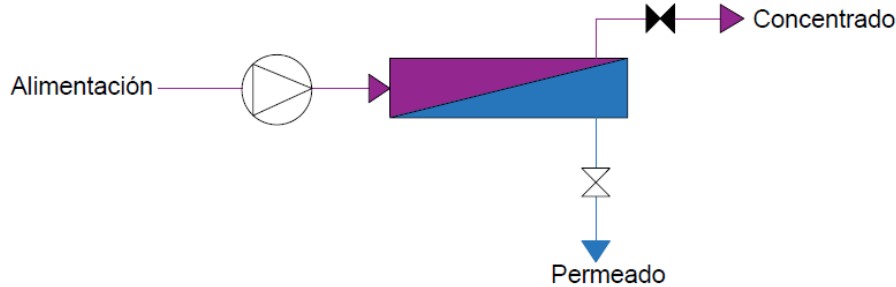
Q<sub>p</sub>: flujo del permeado

Q<sub>f</sub>: flujo de la alimentación

γ: porcentaje de recuperación

$$\gamma = \frac{0.31}{1.72} * 100\%$$

$$\gamma = 18.02\%$$



**Figura 3.3 Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de ósmosis inversa**

La recuperación fue comprobada con el software, donde se obtuvo un porcentaje de recuperación del 18.0% (Figura 3.4). Este porcentaje es el recomendado por el fabricante para este tipo de membrana de ósmosis inversa. En esta configuración no se consideró recirculación debido a restricciones económicas.

**Reverse Osmosis Pass Configuration**

Configuration for Pass 1

Number of Stages:  1  2  3  4  5

Flow Factor:

Temperature: Design  °C

Pass Permeate Back Pressure:  bar

**Flows**

Feed Flow:  m<sup>3</sup>/h

Recovery:  %

Permeate Flow:  m<sup>3</sup>/h

Flux:  LMH

Conc. Recycle Flow:  m<sup>3</sup>/h

Bypass Flow:  m<sup>3</sup>/h

Stages	
Stage 1	
# PV per stage	1
# EIs per PV	1
Element Type	BW30-4040
Specs	
Total EIs per Stage	1
Pre-stage ΔP (bar)	0.31
Stage Back Press (bar)	0.00
Boost Press (bar)	N/A
Feed Press (bar)	0
% Conc to Feed	0.00
Flow Factor	1.00

System Configuration

Feed → Concentrate → Permeate

© 2019 DuPont de Nemours Inc. All rights reserved. Water Application Value Engine Water Solutions

**Figura 3.4 Configuración de los stages y de las características de membrana utilizada**

La membrana de ósmosis inversa seleccionada fue la BW30-4040, la cual tiene capacidad para tratar agua salobre, efluentes industriales y municipales. A continuación, en la Tabla 3.3 se muestran las especificaciones de la membrana reportadas por el fabricante.

**Tabla 3.3 Especificaciones más importantes de la membrana BW30-4040 otorgada por el fabricante**

Especificaciones del producto	Unidad	TM710D
Tamaño	-	4040
Área de la membrana	m <sup>2</sup>	8
Caudal del producto	m <sup>3</sup> /d	9.8
Presión máxima de funcionamiento	bar	41
Caída de presión máxima por elemento	bar	1
Temperatura máxima	°C	45

El sistema de flujo de tratamiento debe tener la presión necesaria para llevar a cabo el proceso de ósmosis inversa, en este caso esta presión fue de 12.3 bares y el consumo energético fue de 2.39 KWh/m<sup>3</sup> como se resume en la Tabla 3.4. Es importante mencionar que el consumo energético se puede optimizar aumentando la cantidad de pasos y elementos (membranas) del sistema, pero llevar a cabo esta optimización en la práctica se encuentra limitado por el factor económico.

**Tabla 3.4 Presión que debe tener la bomba multietapas para que se genere el proceso de ósmosis inversa.**

Detalle	Paso 1
Presión de alimentación (bar)	12.3
Energía específica (kWh/m <sup>3</sup> )	2.39

### 3.5 Trabajo de campo

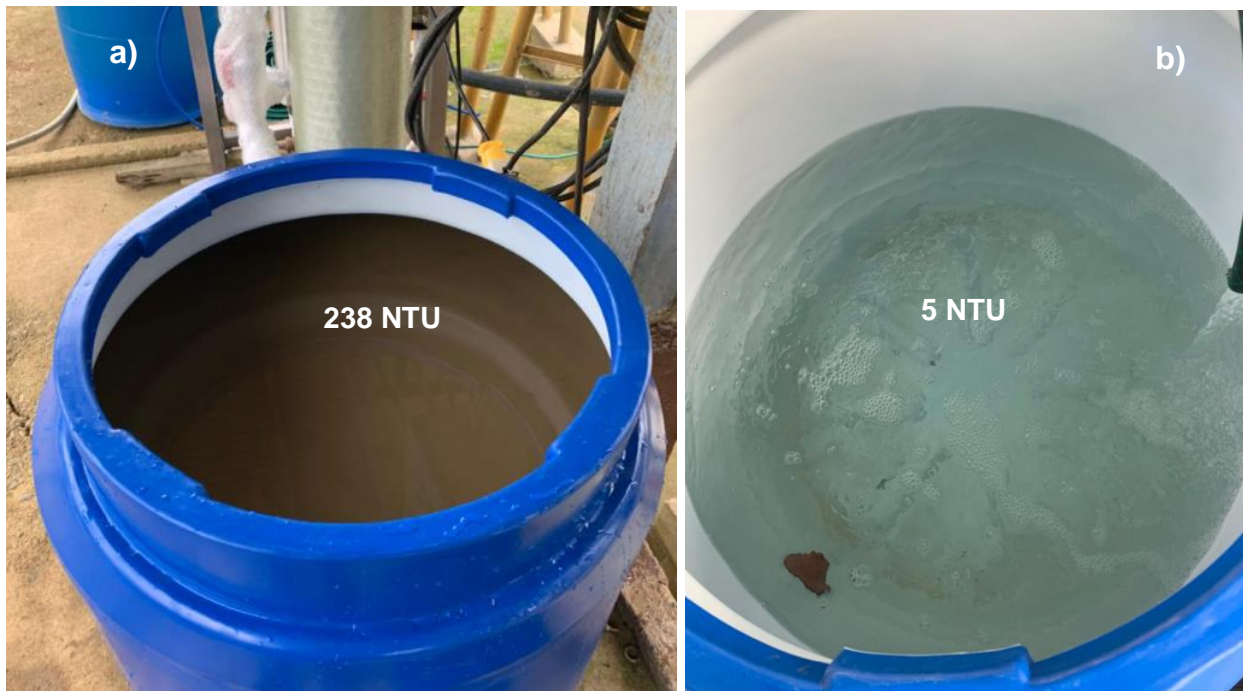
En el reconocimiento de campo se muestrearon 2 efluentes, el primero que corresponde al código EFT3 en el cual el efluente es producto del proceso de tratamiento propio de la empresa para remover cianuro luego de haber sido filtrado hasta el tercer tanque de

carbón activado. El efluente DR4 fue producto del proceso propio de la empresa para remover cianuro luego de haber sido filtrado en todos los tanques de carbón activado. Se observa que las muestras EFT3 y DR4 presentan pH ácidos y conductividades eléctricas entre 1000 y 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En la Tabla 3.5 se pueden observar los resultados de los parámetros inestables medidos en campo. Fue importante verificar que el valor de la turbidez sea  $< 4$  NTU para prevenir el “fouling” inorgánico de la membrana. Por esta razón, se observa que la muestra de agua DR4, que es el efluente que se obtiene del proceso propio de la empresa para remover cianuro, fue la más adecuada para realizar el proceso de filtración con el filtro multimedia y filtros de polipropileno de la planta de tratamiento. La turbidez del efluente DR4 fue de 26 NTU, la cual pudo ser disminuida a través del proceso de filtración de la planta de tratamiento de ósmosis inversa a menos de 1 NTU.

**Tabla 3.5 Resultado de los parámetros inestables tomados durante el reconcomiendo de campo en la empresa minera**

Muestras	Parámetros inestables						TOC (mg/L)
	pH	ORP (mV)	T (°C)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	SDT (mg/L)	Turbidez (NTU)	
EFT3	6.10	201.0	24.35	1397	698	32.1	2.8
DR4	5.84	142.8	23.87	1536	759	26.0	2.2

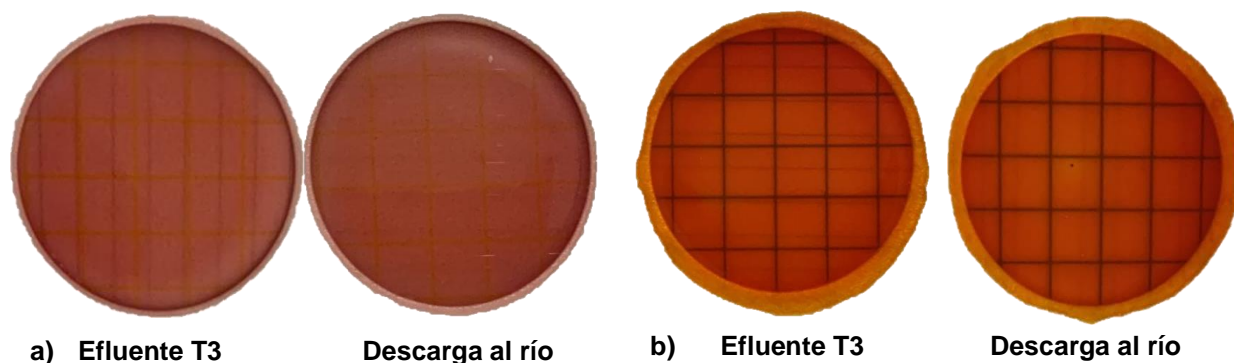
Para evitar el “fouling” o taponamiento tanto orgánico como inorgánico de la membrana, fue importante verificar dos parámetros críticos como la turbidez y el carbono orgánico total (TOC por sus siglas en inglés). De acuerdo con Alvear (2017), la turbidez está relacionada directamente con el taponamiento de las membranas debido a la presencia de sustancias en suspensión. Generalmente, el efluente debe ingresar con una turbidez menor a  $<4$  NTU a la membrana, por lo cual se adaptó a un codo de la tubería de la planta una llave luego del proceso de filtración de 10, 5 y 1  $\mu\text{m}$ . Durante el proceso de tratamiento se monitoreó la turbidez de entrada del agua como se puede observar en la Figura 3.5. La alta turbidez que se observa en la Figura 3.5 (a) se debe a que el nivel de agua en las piscinas de la planta de tratamiento de la empresa minera disminuyó y se comenzó a bombear parte del sedimento de las piscinas. Con respecto a la concentración de TOC es recomendable que no supere los 2 mg/L para alargar la vida útil de la membrana.



**Figura 3.5 a) Efluente DR4 con una turbidez alta, no es apta para ingresar a la planta de ósmosis inversa, b) Efluente DR4 con una turbidez aceptable para ingresar al proceso de tratamiento.**

### **3.6 Análisis microbiológico**

Para identificar la presencia de microorganismos en el agua y por ende la formación de películas bacterianas, se realizó análisis microbiológico en el laboratorio de Sanitaria de la ESPOL, y como muestra la Figura 3.6 hay ausencia de coliformes tanto totales como fecales. Estos resultados corresponden a las muestras tomadas en el reconocimiento de campo. Sin embargo, en caso de existir presencia de coliformes, la planta de ósmosis inversa cuenta con un proceso para desinfección, lámpara ultravioleta. De acuerdo con los resultados de los análisis microbiológicos no se evidencia formación de películas de bacterias, lo que indica un bajo riesgo de taponamiento bacteriano. Debido a la baja concentración de TOC  $< 2.2$  mg/L existe poco alimento para la proliferación de bacterias.



**Figura 3.6 a) Análisis de coliformes fecales en muestras de agua del efluente descargado al río y del tanque 3 de carbón activado y b) análisis de coliformes totales en muestras de agua del efluente descargado al río y del tanque 3 de carbón activado.**

### **3.6.1 Monitoreo diario de turbidez en efluentes**

El monitoreo de la turbidez del efluente que ingresa a la planta de ósmosis inversa se realizó diariamente para asegurar que se cumpla con las concentraciones de turbidez adecuadas de entrada a la planta de ósmosis, <4 NTU. Este proceso de monitoreo se realizó durante 20 días donde también se monitorearon parámetros inestables como pH, CE, SDT y T. El primer día de monitoreo se observó que la turbidez de ingreso variaba, por lo tanto, para obtener un valor promedio de turbidez inicial, se realizó un control de este parámetro cada 5 minutos durante los 30 minutos de funcionamiento de la planta como se muestra en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6 Monitoreo inicial de turbidez durante 30 minutos para verificar la variación de la turbidez durante este tiempo.**

<b>Hora de monitoreo (PM)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>
13:42	1.75
13:47	1.05
13:52	0.74
13:57	1.87
14:02	1.37
14:07	1.74
14:12	3.99
<b>Turbidez promedio inicial</b>	<b>1.79</b>

En los días siguientes del monitoreo, se midió la turbidez inicial cada 10 minutos durante los 30 minutos de funcionamiento de la membrana de ósmosis inversa. Este monitoreo se resume en la Tabla 3.7 durante el tiempo de experimentación en campo con la planta de ósmosis inversa. Se observó que durante los primeros días la turbidez del agua de alimentación era variable con respecto al tiempo, a partir del cuarto día de funcionamiento se identificaron cambios en la concentración de la turbidez con respecto al tiempo; es decir se registró que la turbidez comenzó a descender. Esto pudo deberse a que durante los últimos días de monitoreo del proceso de tratamiento propio de la empresa para remover cianuro se realizó sin interrupciones y empezó a operar desde las 8.00 AM, los primeros días de experimentación, existieron problemas de cortes eléctricos y rotación de personal, afectando el proceso de tratamiento para remover cianuro de la empresa.

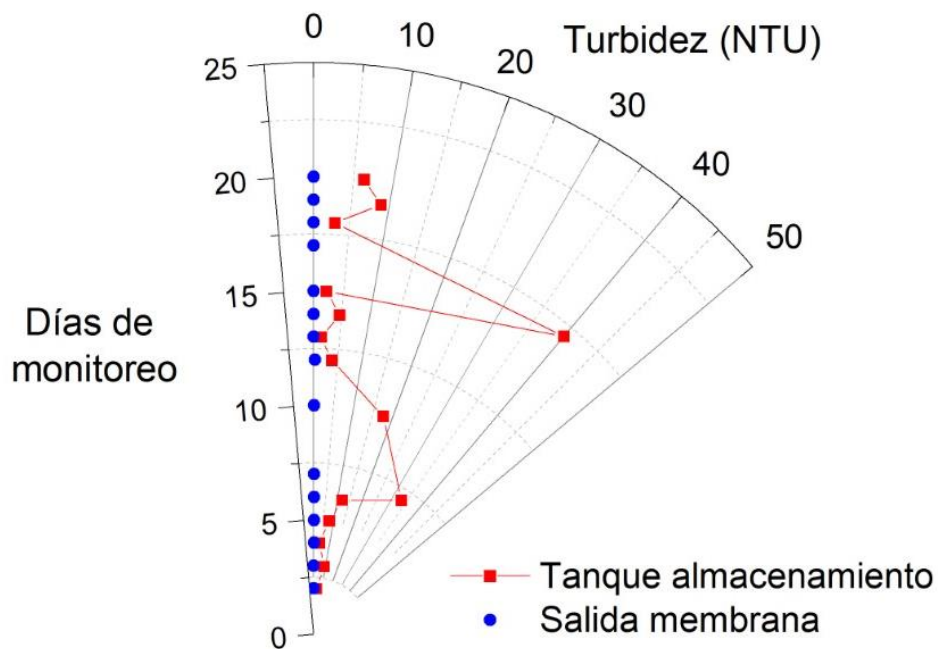
Monitorear la concentración de turbidez es importante para minimizar el taponamiento de la membrana, estos registros indicaron que a la planta de ósmosis inversa ingresaron efluentes con turbiedades  $< 3.5$  NTU en promedio.



**Tabla 3.7 Monitoreo diario de la turbidez cada 10 minutos durante el funcionamiento de la planta de ósmosis inversa.**

N°	Medición de turbidez a los 10 minutos de funcionamiento de la planta (NTU)			Medición de turbidez a los 20 minutos de funcionamiento de la planta (NTU)			Medición de turbidez a los 30 minutos de funcionamiento de la planta (NTU)		
	Tanque de almacenamiento	Después del proceso de filtración	Salida de la Membrana	Tanque de almacenamiento	Después del proceso de filtración	Salida de la Membrana	Tanque de almacenamiento	Después del proceso de filtración	Salida de la Membrana
1	-	2.82	-	-	0.72	-	-	0.81	0.14
2	4.45	2.99	0.14	2.91	1.43	0.19	2.56	1.96	0.15
3	15.8	2.61	0.18	7.39	3.41	0.28	2.89	3.25	0.18
4	5.64	1.77	0.45	2.92	3.43	0.18	2.13	1.99	0.18
5	13.90	2.83	0.28	5.87	1.75	0.31	3.64	1.57	0.20
6	20.00	2.28	0.17	10.30	1.98	0.18	5.71	0.75	0.17
7	63.50	1.99	0.16	22.30	1.36	0.23	13.70	1.33	0.17
10	26.80	1.38	0.20	19.00	1.22	0.19	7.32	0.70	0.20
12	5.82	0.8	0.38	3.18	0.66	0.31	2.47	0.78	0.28
13	1.86	0.09	<0.01	1.50	0.29	<0.01	0.97	0.10	<0.01
14	6.31	1.01	<0.01	4.21	1.18	<0.01	3.49	0.72	<0.01
15	2.59	0.41	0.08	1.98	0.27	<0.01	1.91	0.36	<0.01
17	54.70	3.19	<0.01	44.32	3.04	<0.01	20.95	2.38	<0.01
18	4.54	0.58	<0.01	2.15	0.57	<0.01	2.14	0.41	<0.01
19	12.99	0.75	<0.01	8.23	0.64	<0.01	5.55	0.53	<0.01
20	7.24	0.56	<0.01	5.37	0.41	<0.01	6.31	0.63	<0.01

Los valores de turbidez mostrados en la Figura 3.7 corresponden al promedio de las mediciones de turbidez durante los 20 días de experimentación y operación de la planta. La turbidez fue medida en el tanque de almacenamiento (alimentación de la planta de ósmosis) y en el efluente tratado con la membrana. Las concentraciones de turbidez de entrada fluctuaron entre 2.59 hasta 40 NTU aproximadamente y después del tratamiento con ósmosis inversa la turbidez del agua se mantuvo menor a 0.1 NTU.



**Figura 3.7** Turbidez promedio del efluente antes y después de ser tratado en la planta de tratamiento de ósmosis inversa versus tiempo de monitoreo.

### 3.6.2 Monitoreo de pH en efluentes

En la Figura 3.8 se observa el pH del agua al ingreso y salida del tratamiento con ósmosis inversa. Los valores de pH del agua de entrada varían entre 5.61 hasta 6.25 y luego de ser tratados en la membrana el pH del efluente aumenta, variando desde 7 hasta 8.15. El aumento del pH puede explicarse mediante el principio de Le Chatelier, el cual establece en que un sistema donde se ha producido un cambio se compensará hasta alcanzar un equilibrio. Por ejemplo, en este caso, los bicarbonatos reaccionan con los protones ácidos para formar  $\text{CO}_2$  por lo cual los carbonatos reaccionan con los protones ácidos para reemplazar a los bicarbonatos.

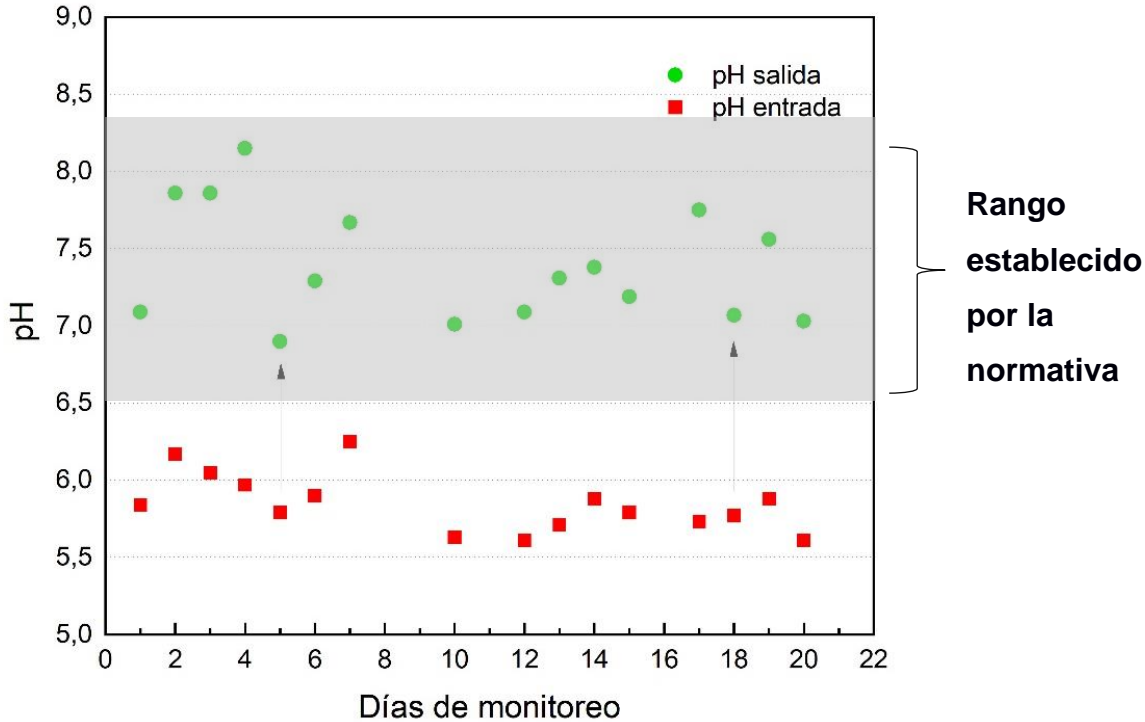
Debido al consumo de protones ácidos, existirá menor disponibilidad de protones ácidos como se observa en las Ecuaciones 3.7 y 3.8.



La reducción de la cantidad de protones  $H^+$  resulta en un pH más alto en el agua como se observa en la Ecuación 3.9.

$$\uparrow pH = -\log(H^+ \downarrow) \tag{3.9}$$

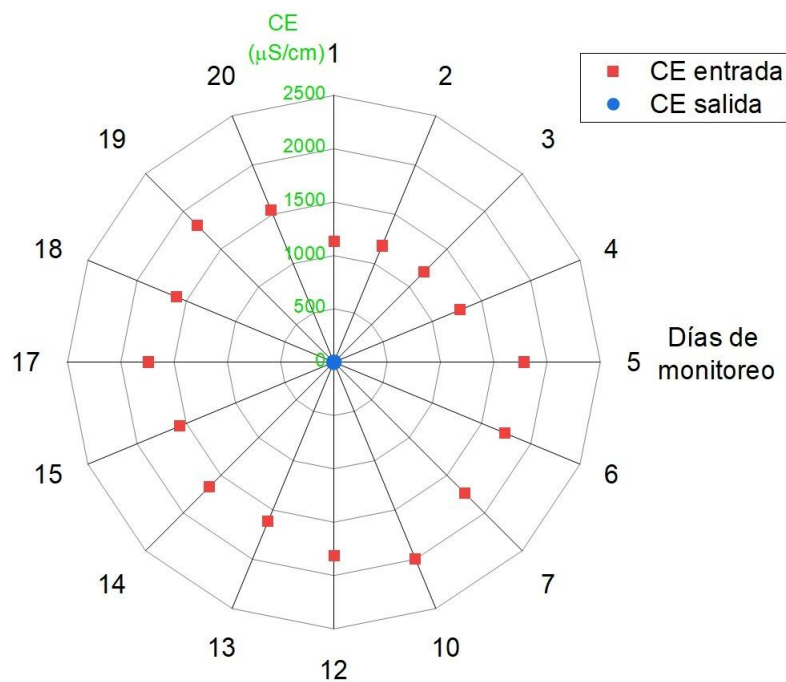
El pH ácido del efluente incumple el rango establecido por la normativa TULSMA, la cual indica un rango de 6.5 a 8.4 para descarga de efluentes mineros. El aumento del pH del efluente tratado con el proceso de ósmosis cumplió con el rango establecido en la normativa que varía desde 6.5 hasta 8.4.



**Figura 3.8** pH del efluente antes y después de ser tratado en la planta de tratamiento de ósmosis inversa versus tiempo de monitoreo.

### 3.6.3 Monitoreo de la conductividad eléctrica (CE) en efluentes

En la Figura 3.9 se presenta la CE del efluente de entrada y salida a la planta de ósmosis inversa. La CE del efluente de entrada varía entre 1130 y 1998  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Luego de ser sometido al proceso de ósmosis inversa, la CE del agua tratada varió en un rango entre 5 y 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo cual fue un resultado esperado debido a que la membrana tiene la capacidad de retener iones como sulfatos, cloruros, sodio, calcio y magnesio, iones que contribuyen a la CE del agua.



**Figura 3.9 CE del efluente antes y después de ser tratado en la planta de tratamiento de ósmosis inversa versus tiempo de monitoreo.**

Este resultado es corroborado con el análisis de iones mayoritarios realizado a muestras escogidas del efluente de entrada y salida del proceso. Por ejemplo, en la Tabla 3.8 se observa el resumen del análisis de efluentes antes y después de ser tratados en la planta de ósmosis inversa y las concentraciones de iones de salida son bajas comparados con las concentraciones de entrada. Uno de los cationes más problemáticos en el agua fue el  $\text{Ca}^{2+}$ , la mayoría de las muestras monitoreadas los días 7, 13 y 21 presentaron valores que variaron entre 252 y 352 mg/L. Estas concentraciones se reducen un 99% luego del

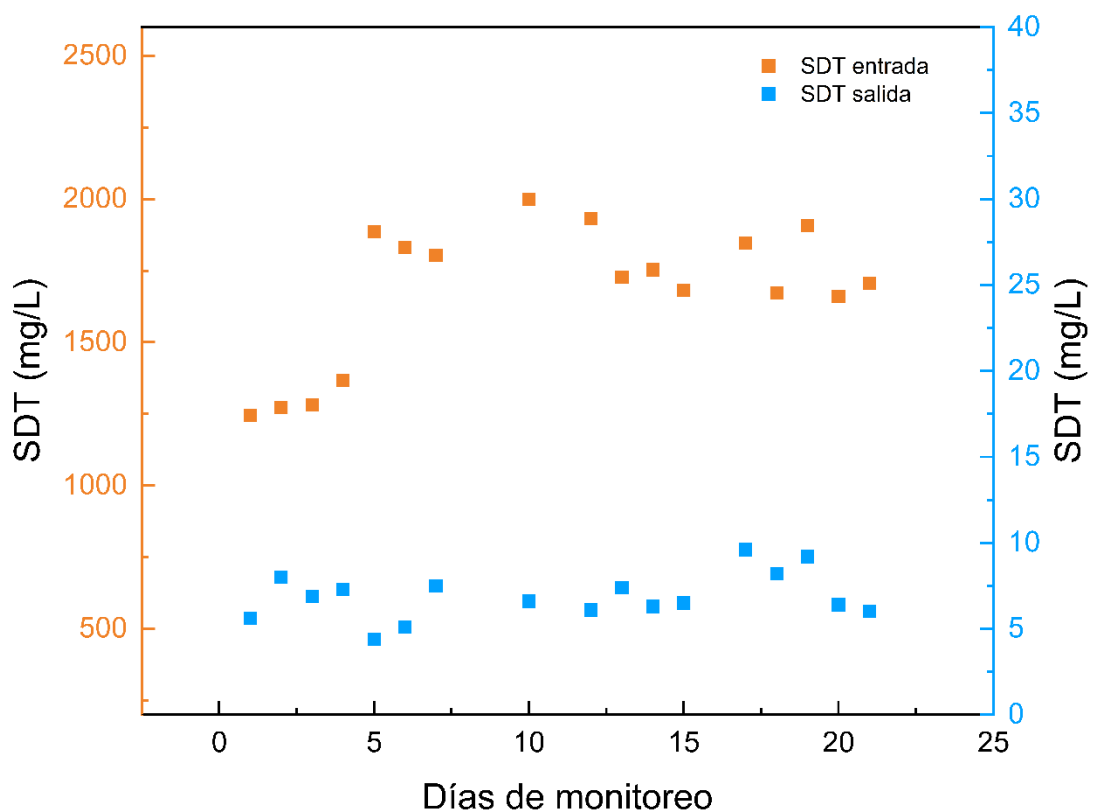
tratamiento del efluente en la planta de ósmosis inversa, obteniendo concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  de hasta 1.60 mg/L. Con respecto a los aniones, la concentración de sulfatos fue elevada, llegando hasta 1100 mg/L, lo cual se entiende se generan por los procesos mineros que se realizan en la planta de beneficio para la extracción de oro. Después del tratamiento del efluente en la planta de ósmosis inversa, la concentración de sulfatos se redujo hasta a 1 mg/L, estando por debajo de lo establecido por la OMS, donde se indica que el rango máximo es de 250 mg/L. Se calculó que las eficiencias de remoción de  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  fue de 60.16 y 59.49%, respectivamente. La membrana de ósmosis inversa no tiene una buena eficiencia de remoción para estos contaminantes. En resumen, el riesgo por fouling inorgánico es bajo debido a que la CE de entrada, se mantienen en rangos entre 1000 y 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Tabla 3.8 Resumen de iones mayoritarios analizados en el laboratorio de Sanitaria de ESPOL, en muestras de agua escogidas aleatoriamente.**

Parámetros (mg/L)	Días de monitoreo						Eficiencia promedio de remoción (%)
	#7		#13		#21		
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
$\text{Na}^+$	55.90	0.40	90.00	<0.01	60.30	0.10	99.71
$\text{Ca}^{2+}$	352.00	<0.01	252.00	1.60	325.00	1.60	99.62
$\text{NO}_2^-$	0.067	0.007	0.008	5.00	0.013	0.009	60.16
$\text{K}^+$	13.00	0.60	13.00	0.40	13.00	0.30	96.67
$\text{NO}_3^-$	2.70	0.50	0.80	0.50	0.40	0.60	59.49
$\text{SO}_4^{2-}$	1100.00	<0.01	920.00	1.00	1000.00	<0.01	99.96
$\text{Cl}^-$	5.10	0.40	3.20	0.20	20.00	0.40	94.64
$\text{Mg}^{2+}$	70.50	1.00	21.90	1.00	38.90	1.00	97.15
$\text{HCO}_3^-$	94.00	4.00	10.00	6.00	92.00	6.00	76.41

### 3.6.4 Monitoreo de sólidos disueltos totales en efluentes

La planta de tratamiento de ósmosis inversa cuenta con un panel de control para medición de sólidos disueltos totales. Se realizó el monitoreo de los SDT como un parámetro de control de buen funcionamiento de la membrana de ósmosis inversa. Al inicio del funcionamiento de la planta de tratamiento se registró una eficiencia de remoción de SDT de 99.55% y durante los días de experimentación las eficiencias variaron entre 99.76% y 99.64%. En la Figura 3.10 se observa las concentraciones de SDT de entrada y salida del agua durante el período de experimentación en campo. La alta eficiencia de remoción de SDT aseguró que la membrana funcione de forma correcta con mínimo taponamiento inorgánico.



**Figura 3.10 SDT del efluente antes y después de ser tratado en la planta de tratamiento de ósmosis inversa versus tiempo de monitoreo.**

Los porcentajes de remoción se confirman con el cálculo del rechazo iónico (RI) mediante la ecuación 3.7.

$$\% RI = \frac{TDS \text{ de agua de alimentación} - TDS \text{ de agua permeada}}{TDS \text{ de agua de alimentación}} * 100 \quad (3.7)$$

$$\% RI = \frac{574-6}{574} * 100 = 99\% \quad (3.8)$$

### 3.7 Análisis de concentraciones de cianuro total y metales pesados

Uno de los principales problemas dentro del proceso de tratamiento para remover cianuro de la empresa minera, es eliminar la presencia de ciertos metales pesados y cianuro total del efluente que será descargado al cuerpo de agua. Por ejemplo, en la Tabla 3.9 se resume las concentraciones de los elementos problemáticos para la empresa minera. Los resultados más actualizados corresponden al año 2020. Se puede observar que tanto las concentraciones de cianuro total, plata y cobre medidas en el laboratorio exceden el LMP establecido en el TULSMA para descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce, siendo parámetros problemáticos para remover del agua. Mientras que los demás parámetros se encuentran por debajo de lo establecido por la normativa. Es importante observar que la concentración de As de 0.084 mg/L se encuentra cercano al LMP de 0.10 mg/L, por lo cual es necesario monitorearlo.

**Tabla 3.9 Resultados del análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec a la empresa minera en el año 2020.**

Parámetro	Concentración (mg/L)	LMP Tabla 9 Anexo 1 TULSMA (mg/L)
<b>Cianuro Total</b>	<b>17.000</b>	<b>0.1000</b>
Arsénico	0.0840	0.1000
<b>Plata</b>	<b>0.2200</b>	<b>0.1000</b>
<b>Cobre</b>	<b>4.6000</b>	<b>1.0000</b>
Cadmio	0.0044	0.0200
Cromo	0.0038	---
Hierro	2.4000	10.000
Mercurio	0.0006	0.0050
Níquel	0.0040	2.0000
Plomo	0.0110	0.2000
Zinc	0.3400	5.0000

Para analizar la eficiencia de remoción de cianuro total del efluente tratado por la planta de ósmosis inversa, se tomó una muestra de agua el día 12 de experimentación en

campo. Los días escogidos para realizar los muestreos dependían del funcionamiento correcto del proceso de tratamiento para remover cianuro y de la turbidez inicial del efluente de entrada a la planta de tratamiento de ósmosis inversa. La Tabla 3.10 muestra que la concentración de cianuro total en el efluente de entrada a la planta fue de 0.32 mg/L y en el efluente de salida fue de 0.01 mg/L, lo cual representa una eficiencia de remoción de cianuro total de 97%. Se obtiene que, para concentraciones bajas de cianuro total en el efluente de entrada, se pueden alcanzar concentraciones de cianuro total por debajo del límite máximo permisible establecido por la normativa TULSMA, 0.1 mg/L.

**Tabla 3.10 Resultados del análisis de cianuro total en el efluente de entrada y salida a la planta de ósmosis inversa realizado por el laboratorio GRUENTEC, N° SAE LEN 05-006**

Muestra	Cianuro total (mg/L)
Entrada a la planta	0.32
Salida de la planta	0.01
% Eficiencia	97.00

En los siguientes días de experimentación, 17-18-19-20, se realizó muestreo de los efluentes de entrada y salida a la planta de ósmosis inversa, recolectando en total 8 muestras para analizar concentraciones de cianuro total, de las cuales el laboratorio reportó altas concentraciones de cianuro total en el agua de alimentación a la planta de ósmosis inversa. Por ejemplo, las concentraciones de cianuro total en el efluente de entrada a la planta de ósmosis inversa variaron en un rango desde 110 hasta 1620 mg/L. Esto significa que los efluentes descargados al cuerpo de agua por la empresa minera exceden la normativa entre 1100 y 16200 veces en cuanto a cianuro total. Después del proceso de ósmosis inversa, se obtuvieron concentraciones de cianuro total bajas, como se muestra en la Tabla 3.11, obteniendo eficiencias de remoción de cianuro total de 99.8% en promedio. Se determinó que la eficiencia de remoción de cianuro total es independiente de la concentración inicial de este contaminante en el efluente. El proceso de tratamiento de agua con ósmosis inversa permite remover cianuro total del efluente que será descargado al cuerpo de agua acorde a lo establecido en el TULSMA Tabla 9



anexo 1, protegiendo y conservando los cuerpos de agua dulce que son utilizados para el proceso de extracción de oro. La molécula de cianuro tiene un tamaño de 600 nm, por lo cual es retenido en la membrana semipermeable que está diseñada para permitir el paso del agua o de moléculas de igual o menor tamaño a los 0.27 nm.

**Tabla 3.11 Resultados de los análisis de cianuro total en los efluentes de entrada y salida a la planta de tratamiento de ósmosis inversa por el laboratorio GRUENTEC, con acreditación N° SAE LEN 05-006**

Día de monitoreo	Cianuro total entrada (mg/L)	Cianuro total salida (mg/L)	LMP acorde TULSMA (mg/L)	Eficiencia de remoción de CN <sup>-</sup> total (%)
17	650.00	0.70	0.10	99.89
18	1620.00	0.70	0.10	99.96
19	110.00	0.09	0.10	99.91
20	150.00	0.90	0.10	99.40

En el reconocimiento de campo del presente estudio, se recolectaron muestras para analizar metales como As, Cu, y Zn. Los resultados del laboratorio acreditado demostraron que la concentración de As fue de 0.167 mg/L, excediendo el LMP de 0.1 mg/L establecido por el TULSMA en la Tabla 9 Anexo 1 para descarga a un cuerpo de agua dulce. Las concentraciones de los demás elementos se encontraron dentro de los permitido en el TULSMA, como se resume en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12 Resultados de los análisis de metales pesados realizados por el laboratorio acreditado Elicrom.**

Parámetro	Medición (mg/L)		LMP Tabla 9 Anexo 1 TULMA (mg/L)
	EFT3	DR4	
Arsénico	0.1668	0.1155	0.100
Cobre	0.6300	0.5400	1.000
Zinc	0.1400	0.1100	5.000

Para analizar la eficiencia de remoción de As en campo, se recolectaron muestras de los efluentes de entrada y salida a la planta de tratamiento de ósmosis inversa durante los

días de experimentación 17-18-19-20. Se encontró que la concentración de As en los efluentes descargados al río por la empresa minera excedía el LMP establecido en la normativa. Por ejemplo, la concentración inicial de As fue de 0.340 mg/L, excediendo 3.4 veces el LMP. Sin embargo, después del proceso de tratamiento se obtuvieron concentraciones de As que variaron entre 0.0009 y 0.0015 mg/L (Tabla 3.13), representando eficiencias de remoción del 98.17% en promedio. Se concluye que la membrana de ósmosis inversa logra remover metales pesados, dado que disminuye significativamente la concentración de As del efluente tratado con ósmosis inversa.

**Tabla 3.13 Resultados de los análisis de arsénico en los efluentes de entrada y salida a la planta de tratamiento de ósmosis inversa por el laboratorio GRUENTEC, con acreditación N° SAE LEN 05-006.**

<b>Día de monitoreo</b>	<b>As entrada (mg/L)</b>	<b>As salida (mg/L)</b>	<b>Eficiencia de remoción de As total (%)</b>	<b>TULSMA (mg/L)</b>
17	0.340	0.0009	99.74	0.100
18	0.160	0.0044	97.25	0.100
19	0.200	0.0069	96.55	0.100
20	0.174	0.0015	99.14	0.100

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

El proyecto integrador se realizó con el objetivo de diseñar un sistema de tratamiento de ósmosis inversa que remueva los contaminantes presentes en los efluentes mineros, mejorando la calidad del agua que es descargada a los cuerpos hídricos en cumplimiento con los LMP establecidos en la normativa ecuatoriana TULSMA.

El monitoreo diario del efluente de entrada y salida permitió observar la variación de los parámetros medidos in-situ. Por ejemplo, el pH fue ácido ( $5.61 < \text{pH} < 6.25$ ) y luego del tratamiento con la membrana aumentó ( $7.04 < \text{pH} < 8.15$ ). El aumento del pH se entiende con el principio de Le Chatelier, donde los bicarbonatos en el agua reaccionan con la presencia de  $\text{H}^+$  disponible, formando  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, para equilibrar esta perturbación, los iones  $\text{CO}_3^{2-}$  reaccionan con los protones ácidos, generando la disminución de los protones disponibles en el agua y consecuentemente el aumento del pH.

Los resultados de los análisis de laboratorio demostraron que las concentraciones de cianuro total del efluente de agua tratada con el proceso de ósmosis inversa fueron bajas (0.9 mg/L, 0.7mg/L, 0.09 mg/L, 0.01 mg/L), independientemente de la concentración inicial de este analito en el agua. Sin embargo, a pesar de la alta eficiencia de remoción de cianuro total (99.79% en promedio), si el proceso de tratamiento del agua que realiza la planta de beneficio mineral no logra remover o disminuir considerablemente el cianuro total, la concentración de este compuesto en el efluente de agua tratada mediante ósmosis inversa podría ser mayor a lo establecido en la normativa ambiental. Por ejemplo, la concentración de cianuro total en el efluente disminuyó de 1620 mg/L a 0.70 mg/L, lo cual excede 7 veces el LMP de 0.1 mg/L establecido en la normativa ambiental.

En los análisis realizados en el laboratorio de la ESPOL, se midieron concentraciones de iones mayoritarios en muestras de entrada y salida a la planta de tratamiento de ósmosis inversa en muestras seleccionadas, con lo cual se concluye que los valores de entrada, por ejemplo, concentración de calcio fue elevada, variaron entre 352 mg/L y 253 mg/L. Sin embargo, una vez ejecutado el proceso de tratamiento de ósmosis inversa, se verificó una disminución considerable de calcio, calculando una eficiencia de remoción del 99.96%, lo mismo sucedió con los sulfatos (99.96%) y dureza total (97.15%). Se debe tener en cuenta que, con el uso a largo plazo de la membrana podría producirse un taponamiento inorgánico, reduciendo la vida útil de la membrana.

La propuesta de crear un sistema descentralizado de ósmosis inversa que permita remover contaminantes en aguas de minas se planteó con la finalidad de minimizar la contaminación y el daño ambiental que producen las descargas de los efluentes mineros a los cuerpos hídricos. Este proyecto contribuye a mejorar la calidad de agua que descargan las empresas mineras a cuerpos hídricos superficiales, demostrando que el sistema de tratamiento propuesto cumple con el objetivo de disminuir la concentración de contaminantes. De esta forma, se contribuye con el cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible N°6: Agua limpia y saneamiento y N°12: Producción y consumo responsable.

## 4.2 Recomendaciones

Se observó que cuando se procesan grandes cantidades de mineral en la planta de beneficio las concentraciones de cianuro total y As aumentan, siendo un indicativo que el proceso propio de la empresa para remover cianuro no está cumpliendo con el objetivo de reducir concentración de contaminantes. En este sentido, se recomienda realizar un monitoreo en cada una de las etapas de tratamiento de agua que aplica la empresa minera para remover cianuro, con la finalidad de identificar qué pasos del proceso deben ser revisados para mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes.

Es necesario realizar la caracterización del efluente de entrada a la planta de tratamiento de ósmosis inversa, es decir el agua de alimentación para dimensionar correctamente la bomba del proceso y escoger la membrana adecuada para el tratamiento. Además, se recomienda mantener un sistema de pretratamiento (filtración) para extender el tiempo de vida útil de la membrana y minimizar su taponamiento.

Se recomienda mantener encendida la planta de tratamiento de ósmosis inversa por más de 10 minutos permitiendo el desarrollo del proceso de tratamiento. Una vez terminada la experimentación en campo, se debe realizar un retro-lavado y almacenar la membrana con metabisulfito de sodio, ~1.0%.

Garantizar representatividad de los resultados es crucial en la experimentación en campo. Por lo tanto, se recomienda preservar las muestras acordes a los lineamientos de los laboratorios acreditados para evitar alteraciones y es deseable que todas las muestras se evalúen bajo las mismas condiciones de conservación y transporte.

# BIBLIOGRAFÍA

- Aduvire, O. (1991). Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento. *Instituto Geológico y Minero de España*, 51.
- Alonso Hidalgo, V. A. (2015). Rizofiltración de plomo del agua de la piscina de relaves de la minera Orenas SA del cantón Camilo Ponce Enríquez-Azuay, utilizando *Coriandrum Sativum* (culantro) en Humedales Artificiales (2014). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 120(11), 259.
- Álvarez Días, J. (2013). *TRATAMIENTO BIOLÓGICO COMO ALTERNATIVA PARA DISMINUIR EL IMPACTO AMBIENTAL OCASIONADO POR EL DRENAJE ÁCIDO, GENERADO POR LA ACTIVIDAD MINERA EN EL MUNICIPIO DE MARMATO-CALDAS*. 45. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/130118/Memoria.pdf>
- Bódalo-Santoyo, A., Gómez-Carrasco, J. L., Gómez-Gómez, E., Máximo-Martín, F., & Hidalgo-Montesinos, A. M. (2003). *Application of reverse osmosis to reduce pollutants present in industrial wastewater*. 155, 101–108.
- Campos, C. L. (2015). *Diseño De Una Planta De Tratamiento De Efluentes Cianurados Por Oxidación Con Dióxido De Azufre, Aire Y Catalizadores De Cobre*. 1–298.
- Caviedes Rubio, D. I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*, 13(1), 73. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
- Denegri-Muñoz, J. E., & Iannacone, J. A. (2020). Tratamiento De Drenaje Ácido De Minas Mediante Humedales Artificiales. *Biotempo*, 17(2), 345–369. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v17i2.3349>
- Hazin, M. S. (2013). *Desarrollo minero y conflictos socioambientales*.
- He, W., Li, H., Xu, Y., Zhong, F., Dong, H., & Wang, M. (2022). *Enhanced Microbial Oxidation – Neutralization Treatment of Acid Mine Drainage Rich in Ferrous Ions ( Fe 2 + )*.
- Lillo, J. (2008). Actividades antropogénicas: Impactos sobre medio ambiente. *Grupo de Estudios En Minería y Medioambiente*, 1–38. [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos de la minería -](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20minería)

Javier Lillo.pdf

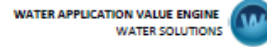
- Ósmosis Inversa | SEFILTRA | Expertos en purificación de fluidos. (n.d.). Retrieved September 25, 2022, from <https://www.sefiltra.com/productos/osmosis-inversa/>
- Oviedo-Anchundia, R., Moina-Quimí, E., Naranjo-Morán, J., & Barcos-Arias, M. (2017). Contamination by heavy metals in the south of Ecuador associated to the mining activity. *Revista Bionatura*, 2(4), 437–441. <https://doi.org/10.21931/RB/2017.02.04.5>
- Ricci, B. C., Ferreira, C. D., Aguiar, A. O., & Amaral, M. C. S. (2015). Integration of nanofiltration and reverse osmosis for metal separation and sulfuric acid recovery from gold mining effluent. *Separation and Purification Technology*, 154, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.08.040>
- Samaei, S. M., Gato-Trinidad, S., & Altaee, A. (2020). Performance evaluation of reverse osmosis process in the post-treatment of mining wastewaters: Case study of Costerfield mining operations, Victoria, Australia. *Journal of Water Process Engineering*, 34(September 2019), 101116. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101116>
- Velásquez, J. A. (2012). *Buenas Prácticas Ambientales y Sociales en la Minería*. 33. <http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2012/cim/documentos/bpracticass.pdf>
- Vendrell-Puigmitja, L., Abril, M., Proia, L., Espinosa Angona, C., Ricart, M., Oatley-Radcliffe, D. L., Williams, P. M., Zanain, M., & Llenas, L. (2020). Assessing the effects of metal mining effluents on freshwater ecosystems using biofilm as an ecological indicator: Comparison between nanofiltration and nanofiltration with electrocoagulation treatment technologies. *Ecological Indicators*, 113(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106213>
- Wright, H. B., & Cairns, W. L. (1998). Original: inglés LUZ ULTRAVIOLETA. *Trojan Technologies Inc*, 1–28. [http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/agua/LUZ\\_ULTRAVIOLETA.pdf](http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/agua/LUZ_ULTRAVIOLETA.pdf)
- Zevallos Santivañez, J. F. (2016). *Título: ESTABILIZACION DEL DRENAJE ACIDO DE MINA (DAM) DE LA EMPRESA PARAISO PERDIDO APATA*. <https://docplayer.es/133255811-Titulo-estabilizacion-del-drenaje-acido-de-mina-dam-de-la-empresa-paraiso-perdido-apata.html>

# **ANEXOS**

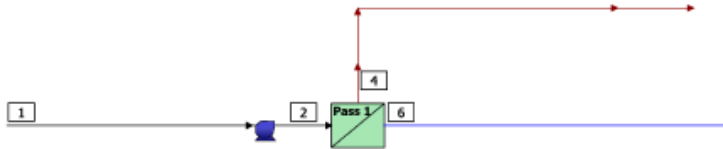


# ANEXO A

Figura A.1 Reporte generado por el programa WAVE



RO Summary Report  
RO System Flow Diagram



#	Description	Flow (m <sup>3</sup> /h)	TDS (mg/L)	Pressure (bar)
1	Raw Feed to RO System	1.21	3,208	0.0
2	Net Feed to Pass 1	1.21	3,210	11.2
4	Total Concentrate from Pass 1	0.98	3,956	10.8
6	Net Product from RO System	0.23	25.71	0.0

RO System Overview

Total # of Trains	1	Online =	1	Standby =	0	RO Recovery	19.0 %
System Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)		Net Feed =	1.21	Net Product =	0.23		

Pass	Pass 1
Stream Name	Stream 1
Water Type	Well Water (SDI < 3)
Number of Elements	1
Total Active Area (m <sup>2</sup> )	7.25
Feed Flow per Pass (m <sup>3</sup> /h)	1.21
Feed TDS* (mg/L)	3,210
Feed Pressure (bar)	11.2
Flow Factor	1.00
Permeate Flow per Pass (m <sup>3</sup> /h)	0.23
Pass Average flux (LMH)	31.7
Permeate TDS* (mg/L)	25.71
Pass Recovery	19.0 %
Average NDP (bar)	8.7
Specific Energy (kWh/m <sup>3</sup> )	2.04
Temperature (°C)	25.0
pH	7.3 (After Adjustment)
Chemical Dose	-
RO System Recovery	19.0 %
Net RO System Recovery	19.0%

Footnotes:

\*Total Dissolved Solids includes ions, SiO<sub>2</sub> and B(OH)<sub>3</sub>. It does not include NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>.

RO Flow Table (Stage Level) - Pass 1

Stage	Elements	#PV	#Els per PV	Feed				Concentrate			Permeate			
				Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Boost Press (bar)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Press Drop (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (LMH)	Perm Press (bar)	Perm TDS (mg/L)
1	BW30-4040	1	1	1.21	0.00	10.9	0.0	0.98	10.8	0.1	0.23	31.7	0.0	25.71

**Figura A.2 Anexo 1 TULSMA, límite de concentraciones para descargas a cuerpos de agua dulce.**

**TABLA 9. LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE**

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sust. solubles en hexano	mg/l	30,0
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro Total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN <sup>-</sup>	mg/l	0,1
Cinc	Zn	mg/l	5,0
Cloro Activo	Cl <sup>-</sup>	mg/l	0,5
Cloroformo	Ext. carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/l	1.000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	2000
Color real <sup>1</sup>	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO <sub>5</sub>	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10,0
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	50,0
Compuestos Organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Compuestos Organofosforados	Organofosforados totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos totales	ST	mg/l	1.600
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg/l	1000
Sulfuros	S <sup>-2</sup>	mg/l	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ± 3
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0

<sup>1</sup> La apreciación del color se estima sobre 10 cm de muestra diluida







**Figura A.6 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra E18**

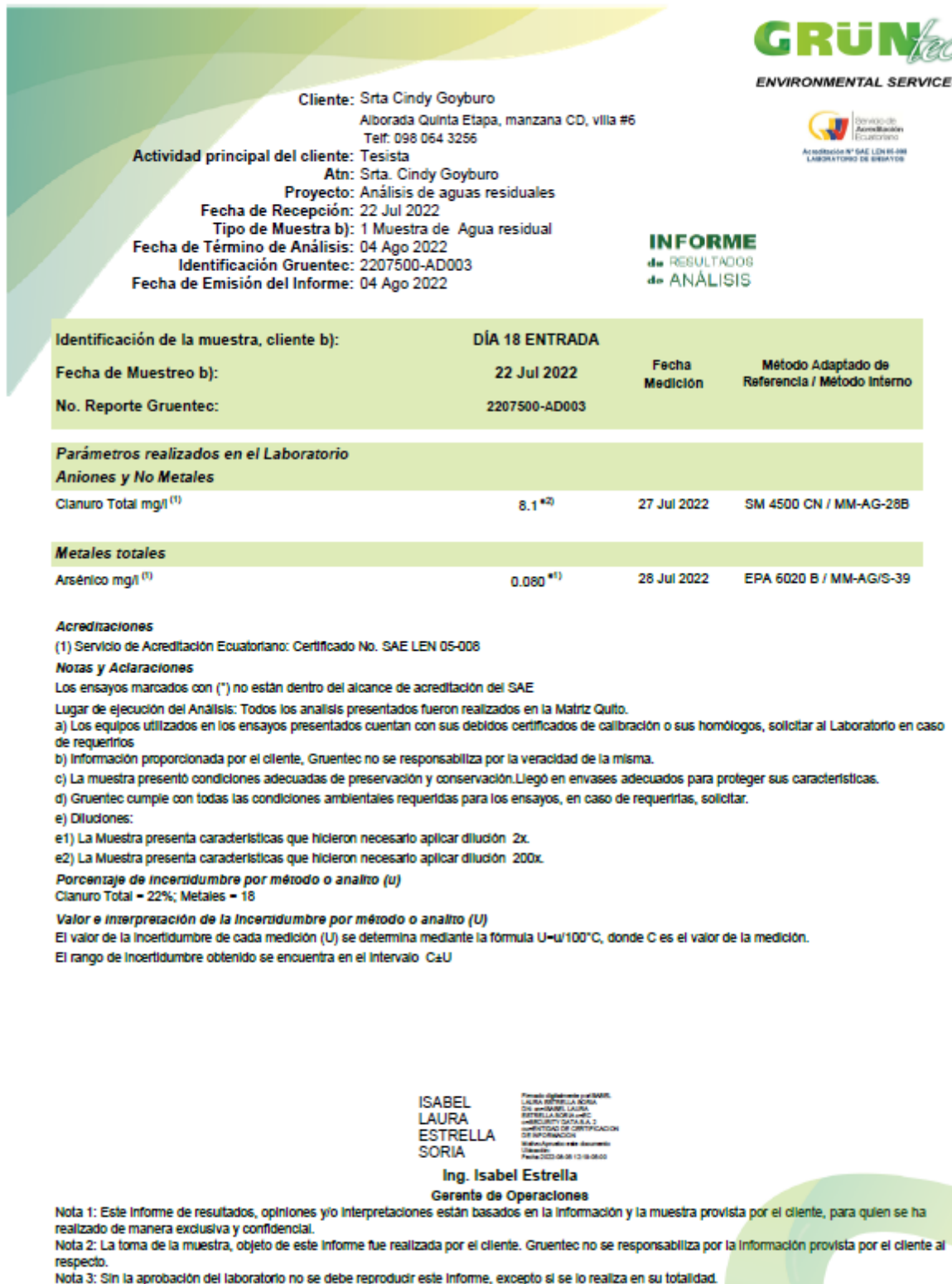






Figura A.7 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra S18

**Cliente:** Srta Cindy Goyburo  
Alborada Quinta Etapa, manzana CD, villa #6  
Telf: 098 064 3256

**Actividad principal del cliente:** Tesista  
**Atn:** Srta. Cindy Goyburo  
**Proyecto:** Análisis de aguas residuales  
**Fecha de Recepción:** 22 Jul 2022  
**Tipo de Muestra b):** 1 Muestra de Agua residual  
**Fecha de Término de Análisis:** 04 Ago 2022  
**Identificación Gruntec:** 2207500-AD004  
**Fecha de Emisión del Informe:** 04 Ago 2022

**INFORME**  
de RESULTADOS  
de ANÁLISIS

Identificación de la muestra, cliente b):	DÍA 18 SALIDA		
Fecha de Muestreo b):	22 Jul 2022	Fecha Medición	Método Adaptado de Referencia / Método Interno
No. Reporte Gruntec:	2207500-AD004		

<b>Parámetros realizados en el Laboratorio</b>			
<b>Aniones y No Metales</b>			
Cianuro Total mg/l <sup>(1)</sup>	0.14 <sup>*1)</sup>	27 Jul 2022	SM 4500 CN / MM-AG-28B

<b>Metales totales</b>			
Arsénico mg/l <sup>(1)</sup>	0.0044	26 Jul 2022	EPA 6020 B / MM-AG/S-39

**Acreditaciones**  
(1) Servicio de Acreditación Ecuatoriano: Certificado No. SAE LEN 05-008

**Notas y Aclaraciones**  
Los ensayos marcados con (\*) no están dentro del alcance de acreditación del SAE  
Lugar de ejecución del Análisis: Todos los análisis presentados fueron realizados en la Matriz Quito.  
a) Los equipos utilizados en los ensayos presentados cuentan con sus debidos certificados de calibración o sus homólogos, solicitar al Laboratorio en caso de requerirlos  
b) Información proporcionada por el cliente, Gruntec no se responsabiliza por la veracidad de la misma.  
c) La muestra presentó condiciones adecuadas de preservación y conservación. Llegó en envases adecuados para proteger sus características.  
d) Gruntec cumple con todas las condiciones ambientales requeridas para los ensayos, en caso de requerirlos, solicitar.  
e) Diluciones:  
e1) La Muestra presenta características que hicieron necesario aplicar dilución 5x.

**Porcentaje de Incertidumbre por método o analito (u)**  
Cianuro Total = 22%; Metales = 18

**Valor e Interpretación de la Incertidumbre por método o analito (U)**  
El valor de la Incertidumbre de cada medición (U) se determina mediante la fórmula  $U=u/100\%$ , donde C es el valor de la medición.  
El rango de Incertidumbre obtenido se encuentra en el Intervalo  $C\pm U$

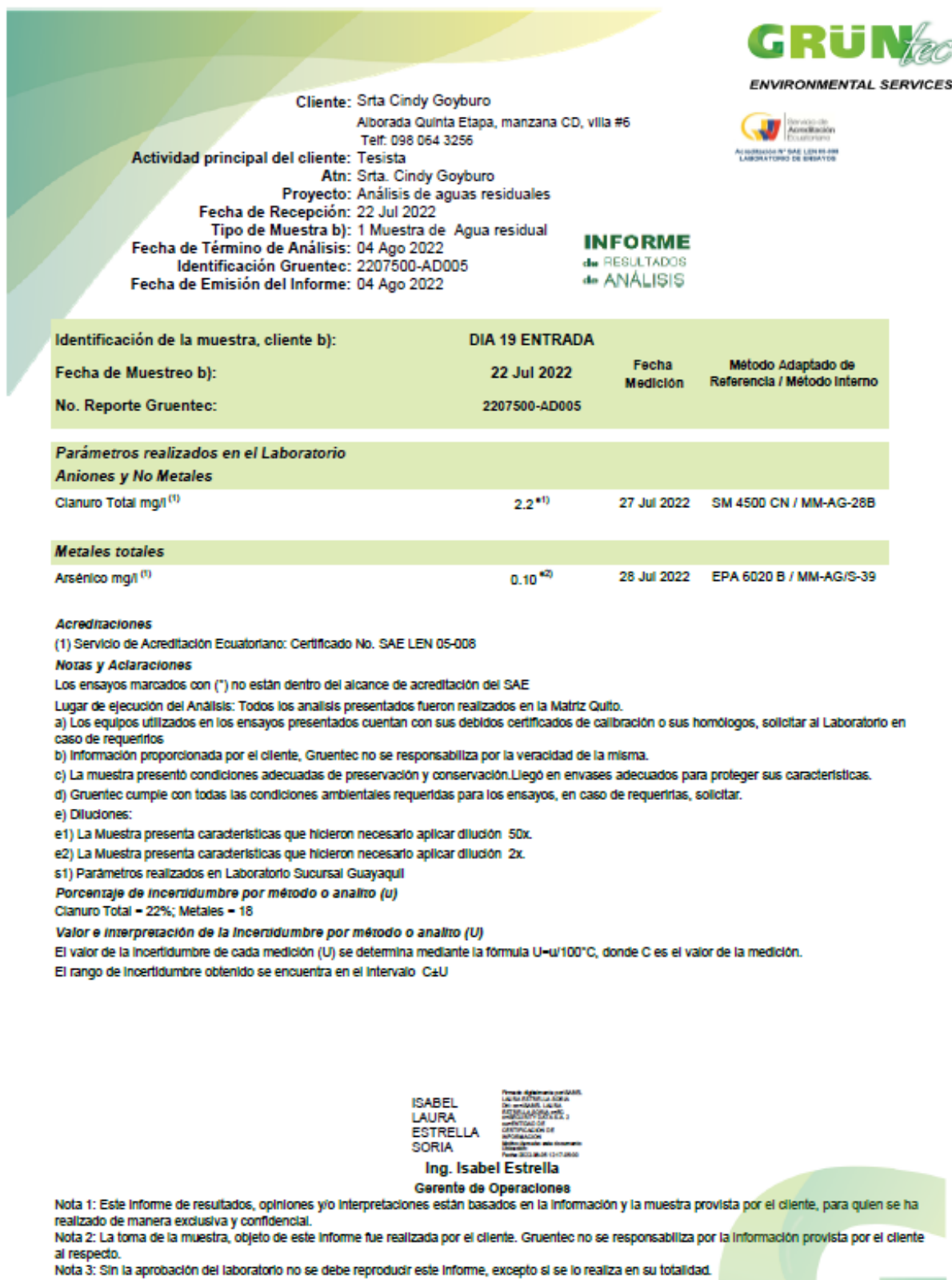
**ISABEL LAURA ESTRELLA SORIA**

Firmado digitalmente por ISABEL LAURA ESTRELLA SORIA  
DN: cn=ISABEL LAURA ESTRELLA SORIA, o=GRUNTEC, ou=LABORATORIO DE ANÁLISIS, c=ECUADOR  
Fecha: 2022.08.04 12:18:08-0500

**Ing. Isabel Estrella**  
Gerente de Operaciones

Nota 1: Este Informe de resultados, opiniones y/o interpretaciones están basados en la información y la muestra provista por el cliente, para quien se ha realizado de manera exclusiva y confidencial.  
Nota 2: La toma de la muestra, objeto de este Informe fue realizada por el cliente. Gruntec no se responsabiliza por la información provista por el cliente al respecto.  
Nota 3: Sin la aprobación del laboratorio no se debe reproducir este Informe, excepto si se lo realiza en su totalidad.

**Figura A.8 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra E19**







**Figura A.10 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra E20**

**Cliente:** Srta Cindy Goyburo  
 Alborada Quinta Etapa, manzana CD, villa #6  
 Telf: 098 064 3255  
**Actividad principal del cliente:** Tesista  
**Atn:** Srta. Cindy Goyburo  
**Proyecto:** Análisis de aguas residuales  
**Fecha de Recepción:** 22 Jul 2022  
**Tipo de Muestra b):** 1 Muestra de Agua residual  
**Fecha de Término de Análisis:** 04 Ago 2022  
**Identificación Gruntec:** 2207500-AD007  
**Fecha de Emisión del Informe:** 04 Ago 2022




**INFORME**  
 de RESULTADOS  
 de ANÁLISIS

Identificación de la muestra, cliente b):	DÍA 20 ENTRADA		
Fecha de Muestreo b):	22 Jul 2022	Fecha Medición	Método Adaptado de Referencia / Método Interno
No. Reporte Gruntec:	2207500-AD007		
<b>Parámetros realizados en el Laboratorio</b>			
<b>Aniones y No Metales</b>			
Cianuro Total mg/l <sup>(1)</sup>	3,0 <sup>(*)</sup>	27 Jul 2022	SM 4500 CN / MM-AG-28B
<b>Metales totales</b>			
Arsénico mg/l <sup>(1)</sup>	0,087 <sup>(*)</sup>	28 Jul 2022	EPA 6020 B / MM-AG/S-39

**Acreditaciones**  
 (1) Servicio de Acreditación Ecuatoriano: Certificado No. SAE LEN 05-008

**Notas y Aclaraciones**  
 Los ensayos marcados con (\*) no están dentro del alcance de acreditación del SAE  
 Lugar de ejecución del Análisis: Todos los análisis presentados fueron realizados en la Matriz Quito.  
 a) Los equipos utilizados en los ensayos presentados cuentan con sus debidos certificados de calibración o sus homólogos, solicitar al Laboratorio en caso de requerirlos  
 b) Información proporcionada por el cliente, Gruntec no se responsabiliza por la veracidad de la misma.  
 c) La muestra presentó condiciones adecuadas de preservación y conservación. Llegó en envases adecuados para proteger sus características.  
 d) Gruntec cumple con todas las condiciones ambientales requeridas para los ensayos, en caso de requerirlas, solicitar.  
 e) Diluciones:  
 e1) La Muestra presenta características que hicieron necesario aplicar dilución 50x.  
 e2) La Muestra presenta características que hicieron necesario aplicar dilución 2x.  
 s1) Parámetros realizados en Laboratorio Sucursal Guayaquil

**Porcentaje de incertidumbre por método o analito (U)**  
 Cianuro Total = 22%; Metales = 18

**Valor e interpretación de la incertidumbre por método o analito (U)**  
 El valor de la incertidumbre de cada medición (U) se determina mediante la fórmula  $U = u \cdot 100\%$ , donde C es el valor de la medición.  
 El rango de incertidumbre obtenido se encuentra en el Intervalo:  $C \pm U$

**ISABEL**  
**LAURA**  
**ESTRELLA**  
**SORIA**

Firmado digitalmente por ISABEL LAURA ESTRELLA SORIA  
 DN: cn=ISABEL LAURA ESTRELLA SORIA, o=GRUNTEC S.A.S, email=ISABEL.LAURA.ESTRELLA@GRUNTEC.COM.ec, c=EC  
 Fecha: 2022.08.04 12:18:08-0500

**Ing. Isabel Estrella**  
**Gerente de Operaciones**

**Nota 1:** Este Informe de resultados, opiniones y/o interpretaciones están basados en la información y la muestra provista por el cliente, para quien se ha realizado de manera exclusiva y confidencial.  
**Nota 2:** La toma de la muestra, objeto de este Informe fue realizada por el cliente. Gruntec no se responsabiliza por la información provista por el cliente al respecto.  
**Nota 3:** Sin la aprobación del laboratorio no se debe reproducir este Informe, excepto si se lo realiza en su totalidad.

**Figura A.11 Resultado de análisis realizado por el laboratorio acreditado Gruntec, muestra S20**

**Cliente:** Srta Cindy Goyburo  
 Alborada Quinta Etapa, manzana CD, villa #6  
 Telf: 098 064 3256  
**Actividad principal del cliente:** Tesista  
 Atn: Srta. Cindy Goyburo  
**Proyecto:** Análisis de aguas residuales  
**Fecha de Recepción:** 22 Jul 2022  
**Tipo de Muestra b):** 1 Muestra de Agua residual  
**Fecha de Término de Análisis:** 04 Ago 2022  
**Identificación Gruntec:** 2207500-AD008  
**Fecha de Emisión del Informe:** 04 Ago 2022


Acreditación N° SAE LEM 05-008  
LABORATORIO DE ENSAYOS

**INFORME**  
de RESULTADOS  
de ANÁLISIS

Identificación de la muestra, cliente b):	DÍA 20 SALIDA		
Fecha de Muestreo b):	22 Jul 2022	Fecha Medición	Método Adaptado de Referencia / Método Interno
No. Reporte Gruntec:	2207500-AD008		
<b>Parámetros realizados en el Laboratorio</b>			
<b>Aniones y No Metales</b>			
Cianuro Total mg/l <sup>(1)</sup>	0.09 *1)	27 Jul 2022	SM 4500 CN / MM-AG-28B
<b>Metales totales</b>			
Arsénico mg/l <sup>(1)</sup>	0.0015	28 Jul 2022	EPA 6020 B / MM-AG/S-39

**Acreditaciones**  
 (1) Servicio de Acreditación Ecuatoriano: Certificado No. SAE LEM 05-008

**Notas y Aclaraciones**  
 Los ensayos marcados con (\*) no están dentro del alcance de acreditación del SAE  
 Lugar de ejecución del Análisis: Todos los análisis presentados fueron realizados en la Matriz Quito.  
 a) Los equipos utilizados en los ensayos presentados cuentan con sus debidos certificados de calibración o sus homólogos, solicitar al Laboratorio en caso de requerirlos  
 b) Información proporcionada por el cliente, Gruntec no se responsabiliza por la veracidad de la misma.  
 c) La muestra presentó condiciones adecuadas de preservación y conservación. Llegó en envases adecuados para proteger sus características.  
 d) Gruntec cumple con todas las condiciones ambientales requeridas para los ensayos, en caso de requerirlas, solicitar.  
 e) Diluciones:  
 e1) La Muestra presenta características que hicieron necesario aplicar dilución 10x.

**Porcentaje de Incertidumbre por método o analito (U)**  
 Cianuro Total = 22%; Metales = 18

**Valor e interpretación de la Incertidumbre por método o analito (U)**  
 El valor de la Incertidumbre de cada medición (U) se determina mediante la fórmula  $U=u/100\%$ , donde C es el valor de la medición.  
 El rango de Incertidumbre obtenido se encuentra en el Intervalo  $C\pm U$

ISABEL  
LAURA  
ESTRELLA  
SORIA

Firma digitalizada con SAE  
 LAURA ESTRELLA SORIA  
 C.E. INGENIERO LAURA ESTRELLA  
 SORIA INGENIERO QUÍMICO  
 SAE SORIC ECUADOR  
 CERTIFICACIÓN DE INFORMACIÓN  
 SORIC SORIC SORIC  
 Ciudad  
 Fecha: 2022/08/04 10:45:46

**Ing. Isabel Estrella**  
Gerente de Operaciones

Nota 1: Este Informe de resultados, opiniones y/o interpretaciones están basados en la información y la muestra provista por el cliente, para quien se ha realizado de manera exclusiva y confidencial.  
 Nota 2: La toma de la muestra, objeto de este Informe fue realizada por el cliente. Gruntec no se responsabiliza por la información provista por el cliente al respecto.  
 Nota 3: Sin la aprobación del laboratorio no se debe reproducir este Informe, excepto si se lo realiza en su totalidad.