

DESARROLLO DE UNA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DEL AGUA
RESIDUAL DE MINA 2 LTDA., PARA SU REUTILIZACIÓN EN LA
AGRICULTURA, EN LA VEREDA EL VIJAL MUNICIPIO DE SAN-MATEO
BOYACÁ.

MARÍA PAULA QUIMBAYO CASALLAS
YAMID GUSTAVO DUARTE BLANCO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019

DESARROLLO DE UNA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DEL AGUA
RESIDUAL DE MINA 2 LTDA., PARA SU REUTILIZACIÓN EN LA
AGRICULTURA, EN LA VEREDA EL VIJAL MUNICIPIO DE SAN-MATEO
BOYACÁ.

MARÍA PAULA QUIMBAYO CASALLAS
YAMID GUSTAVO DUARTE BLANCO

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019

Nota de aceptación

Jurado 1
Ing. Alexander Lopez Castro

Jurado 2
Ing. Diana Marcela Cuesta Parra

Bogotá, D.C., Agosto 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada-García Peña

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Principalmente agradezco a Dios por estar siempre presente en cada paso que doy y por brindarme la oportunidad de vivir plenamente cada día. Agradezco a mi más grande inspiración, mi madre, que con su apoyo y amor incondicional me ha enseñado a dar lo mejor de mí en cada actividad que realizo en mi vida y a quien le quiero demostrar con este nuevo paso en mi vida que sus esfuerzos no han sido en vano y que me convirtieron en la persona que soy ahora, a mi hermana que con su actitud positiva y su personalidad única ha estado presente en cada momento bueno o malo de mi vida, quien me enseñó que la vida hay que disfrutarla cada momento como si fuera el último, gracias a ellas, mis dos personas favoritas que fueron mi motor para seguir luchando por mis sueños y que me han acompañado durante todo el transcurso de esta carrera dándome la suficiente motivación e impulso para culminar con éxito mis estudios universitarios, agradezco también a mis amigos quienes han creído en mí y en mis capacidades convirtiéndose en un apoyo adicional durante esta etapa y por último a mi compañero del proyecto de grado por la confianza que tuvo en mí y por la buena relación de trabajo durante el desarrollo del presente documento.

María Paula Quimbayo Casallas

Agradezco primero al todo poderoso por sus bendiciones sobre mí, su iluminación a este sendero por el que él me guio a caminar, y que año tras año en este proceso, me hizo enamorarme de esta profesión, creer más en mí y en mis capacidades para lograr tan anhelado título. Al igual que a Él, agradezco a mis padres que fueron mi motor, mi impulso, mis ganas y la motivación para seguir luchando cada segmento en el transcurso de esta carrera y nunca desfallecer en el intento de ser un gran ingeniero. A mi padre Emiro Duarte quien hace parte de la sociedad de la empresa, le dedicó este título en especial a él, dado que su valentía para salir adelante y afrontar tantos problemas, lo hacen ser mi ejemplo a seguir. Espero que este proceso o resultado final, mi título, signifique para él un motivo más para ser feliz. No puedo dejar atrás a mis tres Hermanos, que con su lealtad siempre serán una voz de aliento para seguir fortaleciendo, un lazo en el que día a día seguirá siendo rígido frente a cualquier adversidad que se nos pueda presentar en la vida. Y finalmente a una persona muy especial para mí, que estuvo pendiente de nuestras visitas en San Mateo y no solo hablo frente a la realización de este proyecto, sino que ella es para mí, un regalo divino, un ángel que siempre está ahí con sus oraciones, acompañándome desde la distancia y que será una motivación más para ser un gran ser, una gran persona y un gran profesional. Soledad Sepúlveda, mi abuela.

Yamid Gustavo Duarte Blanco

AGRADECIMIENTOS

Principalmente, agradecemos al Ingeniero Luis Guillermo Mesa Higuera, Gerente General de Mina 2 LTDA y a su esposa Ana Meza e hijos por la oportunidad y confianza que depositaron en nosotros para la elaboración del proyecto de grado, brindando su apoyo, herramientas e información para el desarrollo y culminación de objetivos planteados en el presente documento.

A la Fundación Universidad de América por proporcionarnos los conocimientos necesarios y las herramientas para el desarrollo de este proyecto.

A los docentes que atendieron amablemente las consultas e inquietudes, en especial a la Ingeniera Química Nubia Becerra, por su apoyo durante las actividades de laboratorio y por el aporte técnico - experimental que le brindo a nuestro proyecto de grado, y al Ingeniero Químico José Salazar por su acompañamiento y recomendaciones durante el desarrollo del presente documento.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
OBJETIVOS	24
1. MARCO TEÓRICO	25
1.1 GENERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE MINERÍAS DE CARBÓN	26
1.2 PARÁMETROS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AGUA	26
1.3 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES	27
1.4 MÉTODOS TERCIARIOS DE TRATAMIENTO DE AR PARA MANEJO DE IONES INDESEADOS	29
1.5 RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO:	29
1.5.1 Clasificación de resinas de intercambio iónico	33
1.5.1.1 Resinas catiónicas fuertes	33
1.5.1.2 Resinas catiónicas débiles	34
1.5.1.3 Resinas aniónicas fuertes	35
1.5.1.4 Resinas aniónicas débiles	36
1.5.2 Estructura de las resinas	36
1.5.2.1 Matriz polimérica .	36
1.5.2.2 Agente de entrecruzamiento	37
1.5.2.3 Grupo funcional.	37
1.5.3 Propiedades de las resinas	38
1.5.3.1 Tamaño de partícula.	38
1.5.3.2 Solubilidad.	38
1.5.3.3 Forma.	39
1.5.3.4 Densidad.	39
1.5.3.5 Caída de presión.	39
1.5.3.6 Resistencia a la fractura.	39
1.5.3.7 Estabilidad de las resinas.	40
1.5.3.8 Selectividad.	40
1.5.4 Cinética de los procesos de intercambio iónico.	40
1.6 OSMOSIS INVERSA	41
1.6.1 Transporte a través de las membranas de osmosis inversa.	42
1.6.2 Clasificación de las membranas de Osmosis Inversa.	43
1.6.2.1 Según su estructura	43
1.6.2.2 Según su forma	44
1.6.2.3 Según la composición química	44
1.6.2.4 Según la carga superficial	44
1.6.2.5 Según su naturaleza	45
1.6.2.6 Según la presión de trabajo	45
1.6.3 Módulos. .	45
1.6.4 Ensuciamiento de las membranas.	47

1.6.4.1 Causas del ensuciamiento	47
1.6.4.2 Técnicas de limpieza.	47
1.7 ELECTRODESIONIZACIÓN	48
1.7.1 Equipo de electrodesionización.	50
1.7.2 Elementos de la celda de electrodiálisis.	51
1.7.3 Disposición de las membranas.	53
1.7.4 Proceso de transporte a través de las membranas.	53
1.8 REÚSO DE AGUA PARA AGRICULTURA	54
1.9 MARCO LEGAL	55
2. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MINA 2 LTDA, SAN MATEO, BOYACÁ	56
2.1 GENERACIÓN Y FLUJOS DE AGUAS RESIDUALES	56
2.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	57
2.2.1 Desbaste	58
2.2.2 Tanques de sedimentación de lodos primarios y neutralización.	59
2.2.3 Adsorción con carbón y aireación.	61
2.2.4 Adsorción con arcillas.	62
2.2.5 Tanque final en planta de tratamiento.	63
2.3 DIAGNÓSTICO DEL AGUA VERTIDA POR LA MINA PARA FINES AGRÍCOLAS	64
2.3.1 Características físicas y químicas del agua residual	65
2.3.1.1 Toma de muestra.	65
2.3.1.2 Análisis de resultados frente al Marco Legal de vertimientos y agricultura.	66
2.3.1.3 Efecto de las sales sobre las especies agrícolas.	68
2.3.1.4 Efecto de metales pesados en las plantas.	69
3. DESCRIPCIÓN Y VALORACIÓN DE LA ALTERNATIVA PARA LA REUTILIZACIÓN CON FINES AGRÍCOLAS	71
3.1 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	71
3.2 ESTUDIO DE LA ALTERNATIVA CON RESINAS INTERCAMBIO IÓNICO	76
3.2.1 Disponibilidad de resinas..	77
3.2.2 Criterios para la selección de resinas de intercambio iónico.	77
3.2.2.1 Capacidad de intercambio.	77
3.2.2.2 Agente regenerante.	78
3.2.2.3 Disponibilidad y Matriz.	78
3.2.2.4 Costo de adquisición y Volumen de presentación..	78
3.2.2.5 Porcentaje de retención de agua.	78
3.2.2.6 Vida útil.	78
3.2.3 Matriz primaria de selección ..	79
3.2.4 Experimentación y dimensionamiento a escala laboratorio.	82
3.2.4.1 Cálculos para el dimensionamiento teórico .	82
3.2.4.2 Experimentación a escala laboratorio..	87
Activación de la resina MonoPlus MP68.	87

Construcción de la unidad piloto.	88
Toma de la muestra de agua.	89
Resultados y análisis de la experimentación.	91
4. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO	103
4.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA UNIDAD BÁSICA DE INTERCAMBIO IÓNICO	103
4.1.1 Volumen de resina.	103
4.1.2 Área de flujo de la columna.	106
4.1.3 Altura del lecho.	107
4.1.4 Altura de la resina inerte.	108
4.1.5 Altura de la columna	109
4.2 ETAPAS DEL PROCESO	110
4.2.1 Etapa de carga.	111
4.2.2 Etapa de lavado .	116
4.2.3 Etapa de regeneración.	116
4.2.3.1 Cantidad de regenerante.	116
4.2.3.2 Velocidad y tiempo de regeneración.	118
4.2.4 Etapa de enjuague	120
4.3 TIEMPOS DE PROCESO PARA LA SINCRONIZACIÓN DE LAS COLUMNAS	122
4.4 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD Y PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO	123
4.5 MANTENIMIENTO DEL EQUIPO SUAVIZADOR Y OTRAS RECOMENDACIONES	125
4.6 UBICACIÓN EN PLANTA	126
5. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO	128
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA	128
5.2 IDENTIFICACIÓN DE COSTOS	128
5.2.1 Costos de inversión.	128
5.2.2 Costos de insumos.	129
5.2.3 Costos de energía eléctrica .	130
5.2.4 Costos de mantenimiento.:	130
5.2.5 Costo metro cubico de agua tratada.	131
5.3 IDENTIFICACIÓN DE BENEFICIOS	131
5.4 FLUJO DE CAJA	131
5.5 CÁLCULO DE RELACIÓN BENEFICIO/COSTO	132
6. CONCLUSIONES	133
7. RECOMENDACIONES	134
BIBLIOGRAFÍA	135
ANEXOS	138

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Densidades de tipos de resinas	39
Tabla 2. Tipos de módulos y sus características	46
Tabla 3. Resultados fisicoquímicos del año 2011 del ARM	66
Tabla 4. Resultados fisicoquímicos del año 2014 del ARM	67
Tabla 5. Resultados fisicoquímicos del año 2019 del ARM	67
Tabla 6. Relación sulfatos y conductividad	68
Tabla 7. Matriz de Pugh	73
Tabla 8. Matriz ponderada de Pugh	73
Tabla 9. Comparación entre tratamientos de aguas residuales	75
Tabla 10. Convenciones de la matriz primaria de selección	80
Tabla 11. Matriz primaria de selección de resinas de intercambio iónico	81
Tabla 12. Diseño de la columna experimental	85
Tabla 13. Medición de aforo del caudal	90
Tabla 14. Resultados del pH de las muestras	91
Tabla 15. Resultados de la conductividad de las muestras	95
Tabla 16. Análisis de las muestras al mejor caudal	98
Tabla 17. Datos ANOVA	101
Tabla 18. Resultados del ANOVA	102
Tabla 19. Dimensionamiento a escala de la CII	110
Tabla 20. Parámetros en la Etapa de carga	115
Tabla 21. Parámetros en la Etapa de regeneración	120
Tabla 22. Parámetros en la Etapa de enjuague	121
Tabla 23. Costos de inversión	128
Tabla 24. Costos de insumos	129
Tabla 25. Costos de energía eléctrica	130
Tabla 26. Costos de mantenimiento	130
Tabla 27. Costo m ³ de agua tratada	131

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Tratamientos de aguas residuales	28
Cuadro 2. Activación de los tipos de resina	38
Cuadro 3. Clasificación según su estructura	43
Cuadro 4. Clasificación según su forma	44
Cuadro 5. Clasificación según composición química	44
Cuadro 6. Clasificación según la carga superficial	44
Cuadro 7. Clasificación según su naturaleza	45
Cuadro 8. Disponibilidad de resinas	77

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Socavón de la Mina	25
Ilustración 2. Vista de planta de la Mina	25
Ilustración 3. Proceso de Intercambio Iónico	30
Ilustración 4. Diseño de un equipo de INI	31
Ilustración 5. Tipos de resinas de intercambio iónico	32
Ilustración 6. Cadena simplificada de poliestireno	37
Ilustración 7. Cadena de poliestireno	37
Ilustración 8. Mecanismo de Osmosis Inversa	41
Ilustración 9. Modelo de difusión	42
Ilustración 10. Proceso industrial de Osmosis Inversa	43
Ilustración 11. Unidad del equipo de Electro desionización	50
Ilustración 12. Par de celda	52
Ilustración 13. Celdas de la unidad de electrodesionización	53
Ilustración 14. Diagrama de mecanismo de las membranas	54
Ilustración 15. Generación de DAM	56
Ilustración 16. Tratamiento convencional de Mina 2 LTDA	58
Ilustración 17. Sistema de	59
Ilustración 18. Tanque de	60
Ilustración 19. Tanque de adsorción con carbón	61
Ilustración 20. Tanque de adsorción con arcilla	63
Ilustración 21. Tanque final controlador de pH	64
Ilustración 22. CII simplificada	86
Ilustración 23. Resina Monoplus MP68	88
Ilustración 24. Activación de la resina	88
Ilustración 25. Unidad piloto para el INI	89
Ilustración 26. Válvula de bola	89
Ilustración 27. Muestras de ARM	90
Ilustración 28. Conductímetro	91
Ilustración 29. pH-metro	91
Ilustración 30. Comportamiento del pH respecto al tiempo de retención	93
Ilustración 31. Comportamiento de ácidos silicios	94
Ilustración 32. Comportamiento de la conductividad Vs. Tiempo	97
Ilustración 33. Comportamiento de la dureza respecto al tiempo	99
Ilustración 34. Tiempos de proceso de las CII	122
Ilustración 35. Esquema de entrada y carga de regenerante	124
Ilustración 36. Unidad de INI escalado	125
Ilustración 37. Ubicación en planta del proceso de INI	127

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Volumen de resina	82
Ecuación 2. Altura de lecho	83
Ecuación 3. Altura de lecho expandido	84
Ecuación 4. Altura de resina inactiva	84
Ecuación 5. Altura de lecho total	85
Ecuación 6. Capacidad de intercambio	98
Ecuación 7. Relación con dureza	104
Ecuación 8. Relación con conductividad	104
Ecuación 9. Oferta iónica	105
Ecuación 10. Volumen de resina	105
Ecuación 11. Área de flujo dentro de CII	106
Ecuación 12. Altura de resina en la CII	107
Ecuación 13. Altura de lecho expandido	108
Ecuación 14. Altura de resina inerte en la CII	109
Ecuación 15. Altura de la CII	109
Ecuación 16. Velocidad de flujo	111
Ecuación 17. Capacidad operativa máxima	113
Ecuación 18. Volumen de agua entre regeneraciones	114
Ecuación 19. Tiempo entre regeneraciones	114
Ecuación 20. Volumen de regenerante	117
Ecuación 21. Masa de agua para solución regenerante	117
Ecuación 22. Volumen de agua para dilución de NaOH	118
Ecuación 23. Velocidad de regeneración	118
Ecuación 24. Tiempo de regeneración	119
Ecuación 25. Volumen de agua de enjuague	120
Ecuación 26. Tiempo de enjuague	121
Ecuación 27. Flujo de caja	131
Ecuación 28. Relación beneficio/costo	132

LISTA DE REACCIONES

	pág.
Reacción 1. Mecanismos de reacción de Resinas catiónicas fuertes	34
Reacción 2. Mecanismos de reacción de Resinas catiónicas débiles	34
Reacción 3. Mecanismos de reacción de Resinas aniónicas fuertes	35
Reacción 4. Mecanismos de reacción de Resinas aniónica débiles	36
Reacción 5. Reacción fotosintética de las plantas	65
Reacción 6. Comportamiento de la resina aniónica	93

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Análisis FQ según aplicación	139
Anexo B. Norma para vertimientos de aguas en actividades mineras	141
Anexo C. Norma Para Uso De Aguas Tratadas en agricultura	142
Anexo D. Análisis fisicoquímico año 2011 del AR	144
Anexo E. Análisis fisicoquímico año 2014 del AR	145
Anexo F. Análisis fisicoquímico año 2018 del AR	146
Anexo G. Análisis fisicoquímico año 2019 del AR	147
Anexo H. Ficha técnica de resina Lewatit Monoplus Mp68	148
Anexo I. Contenedores requeridos, técnicas de conservación y tiempos de espera	149
Anexo J. Comportamiento teórico de la dureza	151
Anexo K. Factores críticos de la distribución F(0.05), ANOVA	152

ABREVIATURAS

<i>DAM</i>	Drenajes ácidas de minas
<i>RII</i>	Resinas de Intercambio iónico
<i>INI</i>	Intercambio iónico
<i>CI</i>	Capacidad de intercambio
<i>AR</i>	Aguas residuales
<i>ARM</i>	Agua Residual de la mina
<i>FQ</i>	Físico-Químico
<i>DVB</i>	Divinilbenceno
<i>R</i>	Agente Regenerante
<i>CII</i>	Columnas de intercambio iónico
<i>CA</i>	Columna aniónica
<i>Cani</i>	Carga aniónica
<i>Q</i>	Caudal
<i>Cd</i>	Conductividad
<i>Du</i>	Dureza
<i>°F</i>	grados hidrotimétricos franceses
<i>IO</i>	Oferta iónica
<i>D_C</i>	Diámetro de la columna de intercambio
<i>A_f</i>	Área de flujo dentro de la CII
<i>V_R</i>	Volumen de resina utilizada
<i>h_f</i>	Altura de la resina en la CII
<i>E_x</i>	Expansión del lecho
<i>h_e</i>	Altura extendida del lecho
<i>H_{fb}</i>	Altura zona libre columna
<i>h_i</i>	Altura de la resina inerte
<i>V_i</i>	Volumen de la resina inerte dada por el proveedor
<i>Vel</i>	Velocidad de flujo de entrada a la CII
<i>C_{op}</i>	Capacidad total operativa de la resina
<i>C_{opm}</i>	Capacidad operativa máxima
<i>W_R</i>	Peso de la resina
<i>ρ_R</i>	Densidad aparente de la resina

GLOSARIO

ACTIVACIÓN: proceso que consiste en colocar la resina en contacto con una solución activadora para poder ejecutar el mecanismo de funcionamiento del sistema en ese instante o en un momento posterior.

AGUA RESIDUAL: agua con alta carga de contaminantes derivada de desechos urbanos o procesos industriales accionados por el hombre, que al no ser tratadas adecuadamente y vertidas son potencialmente peligrosas para el medio ambiente.

ANÁLISIS FISICOQUÍMICO: estudio de las propiedades físicas y químicas de una muestra a partir de diferentes métodos, con el fin de determinar características básicas y especiales de la materia a tratar.

ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD: estudio preliminar de los requerimientos de inversión de un proyecto y su posible financiamiento, así mismo la disponibilidad de insumos y la posibilidad de implementación del proyecto.

CARBÓN: roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono y con proporciones pequeñas de otros elementos, que se origina por la descomposición de materia orgánica acumulada en la tierra por un largo periodo de tiempo.

CICLO DE OPERACIÓN: conjunto de procesos que abarca un sistema para cumplir con el objetivo de operación en un tiempo determinado.

CO-CORRIENTE: flujo de dos fluidos que se da en la misma dirección

CONDUCTIVIDAD: propiedad física de los materiales o sustancias para permitir el paso de corriente eléctrica a través de él, en los líquidos es debido al número de iones disueltos en la solución.

CONTRACORRIENTE: flujo de dos fluidos que se da en sentidos opuestos

DIMENSIONAMIENTO: estimación de las magnitudes o valores precisos de un sistema para su futura esquematización a escala real.

DUREZA: propiedad física de sustancias que se refiere a la concentración de compuestos minerales que hay en una cantidad determinada, para el caso del agua, se refiere a la concentración especialmente de sales de magnesio y calcio.

ETAPA DE CARGA: operación en la que tiene lugar el intercambio de iones de la solución a tratar y la resina por el contacto entre ellas en una columna de intercambio.

INERTE: sustancia o material que carece de la capacidad de provocar reacciones químicas.

REGENERACIÓN: operación que consiste en someter a la resina a un proceso de purificación una vez esta saturada para que se pueda reutilizar, se realiza empleando una solución concentrada en el ion originalmente de la resina.

RELAVES: los relaves son residuos de procesos mineros que usualmente corresponden a un conjunto de desechos tóxicos constituidos por mezcla de rocas molidas, agua, minerales sin valor comercial y bajas concentraciones de metales pesados.

REUSO: acción de someter una sustancia o material de volver a ser usada en el mismo proceso o en otro diferente.

SODA CÁUSTICA: sustancia básica conocida también como hidróxido de sodio usada en la industria química para la fabricación de papel y detergentes.

SATURACIÓN: término que se utiliza para describir una solución que no puede disolver más cantidad del elemento disuelto.

TIEMPO DE RETENCIÓN: se refiere al tiempo que se debe mantener un volumen de agua tratada dentro de la columna, con el fin de cumplir con el objetivo de intercambio iónico a los límites que se quieran.

POTENCIALES HIDRÍCOS: no es más que la energía potencial de una masa de agua, que se fundamenta de varios ítems, como lo es la concentración hacia donde fluirá este líquido, la presión que conlleva (alta o baja), la altura dependiendo de un potencial gravitacional y la humedad; todo esto para fundamentar un base biofísico del movimiento del agua y el crecimiento celular.

DUREZA TEMPORAL: está conformada por los bicarbonatos de calcio y magnesio en el agua, y es temporal debido a que, por efectos de hervir el agua, se depuran en su totalidad.

DUREZA PERMANENTE: esta ya la conforman las sales de calcio y magnesio procedentes de sulfatos y cloruros dependiendo de la naturalidad del agua.

SENESCENCIA EN PLANTAS: no es más que un proceso fisiológico de muerte celular que se asemeja a una senescencia foliar que atribuye un envejecimiento natural de las hojas y su posterior degeneración de los tejidos de la planta.

CICLO DE CALVIN: es un proceso de sinterización de azúcar por medio de un conjunto de reacciones que ocurren en el estroma del cloroplasto dado el dióxido de carbono que entra al interior de las plantas. Se resume el ciclo en tres procesos, Fijación del carbono, Reducción y Regeneración.

RESUMEN

La empresa Mina 2 LTDA, es una industria que extrae carbón coquizable en el municipio de San Mateo en el departamento de Boyacá, ésta cuenta con un sistema de tratamiento de agua residual fisicoquímico; el agua tratada es vertida a la cuenca del río Nevado, para evaluar la alternativa de uso para riego agrícola, se realizaron análisis de calidad al agua obteniendo que los parámetros de conductividad (4350 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y sulfatos (2554 mg/L) se encuentran por encima de lo requerido legalmente en la resolución 1207 del 2014. Dado que los iones disueltos pueden eliminarse utilizando resinas de intercambio iónico, se revisaron las características de seis referencias comerciales mediante una matriz de selección Pugh, luego fue diseñada una columna de intercambio que incluyó la resina seleccionada, durante los tratamientos realizados se determinó la conductividad obteniendo reducciones hasta de 1407 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Posteriormente se proyectó un sistema para el caudal real de 1.5 $\text{m}^3/\text{día}$.

Palabras clave: Mina, sulfatos, conductividad, pH, resinas, intercambio iónico

INTRODUCCIÓN

El carbón es uno de los combustibles fósiles de menor costo y más abundantes en nuestro país posicionándose como el quinto país exportador de carbón térmico¹ que según sus características representan un aprovechamiento energético. Al hablar de minería de carbón, se imagina destrucción, contaminación y cambios de la visual. Una de las problemáticas principales de esta clase de minería es la alteración y destrucción de cuerpos de agua, ya sean subterráneas o superficiales debido a su alto contenido de componentes ácidos, niveles conductivos altos, y gran cantidad de sólidos disueltos². Pese a la importancia del recurso hídrico empresas como es el caso de Mina 2 LTDA., situada en el municipio de San Mateo al norte del departamento de Boyacá, luchan contra esta problemática, buscando soluciones en tratamientos para la purificación y adecuación de estas aguas fruto del drenaje de tal actividad minera, no obstante la visión de la empresa no queda estancada en solo buscar tratamientos sino en el poder reutilizar esos flujos de agua en sectores principalmente agrícolas en cercanías a la sociedad minera, forjando así un lazo estrecho con el campesinado del sector veredal.

En el capítulo inicial se abordaron las cuestiones teóricas fundamentales del planteamiento, infiriendo frente a las causas que conllevan a la generación de tales drenajes mineros, la forma de evaluación y conocimiento de la calidad del agua, la diversidad de tratamientos divulgados en la industria minera y fuera de este contexto, y la importancia de utilizar tales recursos tratados en relación con las normativas legales y ambientales del estado colombiano. Seguido de esto, se requirió comprender el sentido de esta investigación reconociendo la generación y flujos de este recurso en la actividad minera, abordando un escaneo general del proceso productivo de la mina identificando de ese modo, el proceder del problema descrito y a solucionar. Se abordó sin duda alguna, la fuente principal que conlleva a que tal problema, como lo es la contaminación de las aguas subterráneas sea notoria, y fundamentó la explicación del tratamiento que se ha venido realizando durante los últimos años, con la finalidad de indicar paso a paso como se ha venido depurando los contaminantes al pasar por cada punto de este tratamiento y así identificar la calidad del agua que se tiene en el momento, mediante un análisis físico-químico de este líquido al final del procedimiento descrito.

En capítulos más adelante, dada la variedad de tratamientos frente a disposiciones específicas de vertimiento o cualquier tipo de uso, la industria ha presentado una diversidad de referentes que sirvieron en la realización de matrices de selección indagando así, el mejor tratamiento asemejando la mejor opción según las características en las que se encuentra dicho recurso hídrico, al igual que la disponibilidad para su adquisición en Colombia. Por consiguiente, determinado un

¹Colombia, un país minero (2013). *El sector minero participa con el 2,3% del PIB Colombiano*. Colombia CO. Disponible en línea: <https://www.colombia.co/extranjeros/negocios-en-colombia/inversion/colombia-un-pais-minero/>

² CIRELLI, Angie. (2012). Water, an essential resource. *Química Viva*. 11(3). pp.147-170.

análisis general la empresa Mina 2 LTDA se enfatizó que esta requiere de la implementación de un sistema adicional para la eliminación de los contaminantes en el agua residual. Por ello, el presente proyecto evaluó la alternativa con resinas de intercambio iónico dado que estas pueden llegar a eliminar una cantidad notable de sales (problema esencial de esta agua) en ciertos intervalos de tiempo³, para dar cumplimiento con los parámetros legales y no interferir si se da su uso, en el crecimiento y producción de cultivos del Municipio de San Mateo.

Con esto descrito, se abordó a iniciar una experimentación con este tipo de resinas mediante un análisis que determinó la viabilidad de la propuesta descrito a lo largo del documento, culminando con la presentación de requerimientos frente su posible implementación y adición al tratamiento existente. Adicionalmente se enfatizó sobre los costos que conllevarían implementar la propuesta y se generó la vez, un análisis de beneficio-costos donde se comparó la totalidad que vale tratar el agua por este método con valores reales de costos de este mismo efectuados industrialmente y así verificar de esta manera, la factibilidad de la propuesta.

³ DIAZ ARRÓNIZ, Sandra. Sistema automático para la determinación de la dureza del agua en descalcificadoras domésticos. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Politécnica de Cartagena España. Escuela técnica superior de Ingeniería Industrial 2018. 29-68 p.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una alternativa para el tratamiento del agua residual de mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, en la vereda el Vijal Municipio de San-Mateo Boyacá.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el estado actual del agua vertida por la mina.
- Seleccionar la alternativa de tratamiento del agua residual para reuso en la agricultura por medio de un desarrollo experimental.
- Establecer las especificaciones técnicas de la alternativa seleccionada para su aplicación en el tratamiento actual de la mina.
- Estimar costos de inversión de la propuesta mediante un análisis de prefactibilidad.

1. MARCO TEÓRICO

La empresa Mina 2 LTDA se encuentra ubicada al Norte del departamento de Boyacá, en el Municipio de San Mateo, en una vereda llamada el Vijal. Este Municipio es considerado un punto estratégico para las actividades mineras del país marcando un crecimiento económico a la comunidad del sector. De los cuatro sistemas fundamentales de extracción minera: de superficie, por dragado, por pozos perforados y subterránea, Mina 2 LTDA emplea un sistema de minería subterránea de roca blanda, específicamente carbón lignito, extrayendo diariamente 45 toneladas de este mineral que es vendido a Multinacionales encargadas de su exportación.

Ilustración 1. Socavón de la Mina



Ilustración 2. Vista de planta de la Mina



Fuente: Instalaciones de Mina 2 LTDA

Para la explotación de este recurso no renovable se emplean martillos eléctricos que perforan la roca y posteriormente el mineral es transportado fuera del socavón por coches que son jalados por un malacate manipulado afuera de la Mina, internamente posee un sistema de ventilación con el objetivo de llevar aire fresco a los mineros y evitar la acumulación de gases peligrosos como el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y ácido sulfhídrico (H_2S), adicionalmente de la extracción del lignito, se extraen altas cantidades de agua debido a los yacimientos existentes en el subsuelo, que por la explotación y perforación de la roca es liberada y transportada por canales ubicados dentro del socavón a tanques de relaves, sumado a esto se incrementan estos caudales debido a la filtración de aguas lluvias.

1.1 GENERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE MINERÍAS DE CARBÓN

La generación de aguas residuales hoy en día es una actividad inevitable de cualquier actividad humana e industrial, según la FAO se definen como “Agua que no tiene valor inmediato para el fin para el que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella. No obstante, las aguas residuales de un usuario pueden servir de suministro para otro usuario en otro lugar”⁴ (FAO). Las labores de explotación y extracción del carbón y cualquier otro mineral, generan caudales de aguas residuales, que, al circular por las instalaciones de desagüe de la mina, ocasionan que existan cambios físicos y químicos en el agua, dando lugar a aguas residuales ácidas, con altas concentraciones de sólidos suspendidos debido al arrastre de una variedad de partículas y con un elevado contenido de metales pesados propios de los yacimientos.

Las aguas ácidas de minería son producto de la oxidación química y biológica de la pirita, la cual es la fase mineral más abundante del lignito junto con el cuarzo, caolinita e illita, que reaccionan con otros elementos importantes para la formación de este tipo de agua minera como lo son agua, aire y las bacterias. Su caracterización se basa en bajos contenidos de pH y altos valores de concentración de sólidos disueltos totales y de metales en particular Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Titanio (Ti), Plomo (Pb), Arsénico (As), Estroncio (Sr) y Circonio (Zr)⁵ que conllevan a un cambio considerable en varias de sus propiedades, como lo es pH, carga biológica, conductividad, entre otros. Es necesario entonces realizar una depuración de este tipo de aguas antes de ser vertida a cuerpos receptores cercanos (Lagos, Lagunas, Ríos, etc.) e incluso para la reutilización en alguna otra actividad, con el fin de proteger el medio ambiente y aprovechar al máximo este recurso natural. Sin embargo, para poder establecer un mecanismo de tratamiento de las aguas residuales se necesita tener un amplio conocimiento de las características fisicoquímicas del efluente.

1.2 PARÁMETROS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AGUA

Los análisis fisicoquímicos de las aguas residuales permiten dar una caracterización del agua para establecer la calidad del agua e identificar los métodos de tratamientos más adecuados para su vertimiento o reutilización. En el presente proyecto se quiere hacer una reutilización del agua residual de Mina 2 LTDA, y es necesario hacer la evaluación de la calidad del agua mediante algunos parámetros de importancia al reutilizarla en la agricultura, como lo son conductividad, sólidos

⁴FAO, Descripción de los usos de las aguas residuales tratadas por la población. Control y beneficio.[En línea]<<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/glossary/search.html?lang=es&keywords=aguas+residuales&submit=Search&subjectId=-1&submitBtn=-1&p=100&termId=-1> > [citado el 24 de enero del 2019]

⁵ Tomado de Composición fisicoquímica de aguas ácidas procedentes de las minas de carbón: Lobatera, Estado Táchira, Venezuela, Montero, R., Martínez, M.

disueltos totales y en suspensión, presencia de metales pesados, entre otros, evidenciados en el **ANEXO A**, en donde se visualizan varios de los análisis que se deben realizar según la aplicación que se le quiera dar al agua residual, tomado del manual de Análisis de Agua HASH, y algunos de ellos son explicados a continuación:

- **Conductividad:** esta propiedad física está relacionada con la presencia de sales que se disocian en iones que permiten el paso de la corriente eléctrica. Muchas plantas son sensibles al contenido de estas sales disueltas, que conlleva a afectaciones del suelo en el desarrollo de las actividades agrícolas y la futura inutilización del terreno, por lo tanto, es necesario establecer ciertos parámetros de aplicación en la calidad del agua respecto a varios parámetros que afectan en ella.
- **Sólidos disueltos totales:** son sustancias orgánicas e inorgánicas que están presentes en el agua y que al encontrarse en exceso puede causar corrosión, daños de tubería, y en lo que más nos concierne una afectación en la irrigación de cosechas, por ellos es necesario conocer el límite con el que se puede trabajar esta propiedad en los sistemas de riego⁶.
- **Sólidos en suspensión:** los sólidos en suspensión es otro de los parámetros utilizados para conocer la calidad del agua y se refieren a sólidos que se encuentran dispersos en el agua debido a que la densidad de ellos es menor o igual a la del agua, estos en los sistemas de riego causan taponamientos que reducen el caudal y consecutivamente disminuye la uniformidad de aplicación del agua de riego⁷.
- **Metales pesados:** las aguas residuales de la explotación del carbón contienen impurezas como: Bisulfuro de hierro (FeS_2), Sulfuro de Zinc (ZnS), Sulfuro de Níquel (NiS), Sulfuro de Cobre (CuS) y Sulfuro de Plomo (PbS); las cuales pueden ser oxidadas por la acción del aire y microorganismos, formando lixiviados de bajo pH y altas concentraciones de sulfatos y metales pesados que se denominan drenajes ácidos de minas (DAM)⁸

1.3 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

Los tratamientos de AR consisten en realizar ya sean procesos físicos, químicos o biológicos con el objetivo de reducir o eliminar los contaminantes que esta puede cargar, y mediante esto generar efluentes no dañinos para la salud y el medio

⁶ AVALOS, Torres., y GONZALES, Lozano.(2017). Decrease of solids in gray water by aeration process. *Ra ximhai*. 13(3).p 393-404

⁷ Tomado de Taponamiento de goteros y del filtro de discos con agua residual sanitaria de una laguna de maduración, Batista, R., Soares, A., Zapata, O., Rodríguez, J., Astoni, D., Abril 29 del 2009. p 4958

⁸ Tomado de Remoción de metales pesados de drenajes ácidos de minas de carbón usando

ambiente o de un valor agregado por su reutilización. En la actualidad hay una variedad de métodos de tratamiento de AR por la diversificación en la composición de estas, las empresas mineras de acuerdo a la calidad del agua residual que produce su actividad pueden utilizar varios procesos de depuración, que se pueden clasificar en pretratamientos, tratamientos primarios, secundarios y terciarios

Cuadro 1:

Cuadro 1. Tratamientos de aguas residuales

PRETRATAMIENTOS	Destinados a preparar las aguas residuales para que puedan recibir un tratamiento subsiguiente sin perjudicar a los equipos mecánicos y sin obstruir tuberías y causar depósitos permanentes en tanques. Por ejemplo: Desbaste, Desarenado, Desengrasado.
TRATAMIENTOS PRIMARIOS	Son operaciones físicas que se emplean para la separación de sólidos de gran tamaño, sólidos suspendidos y flotantes, grasas y compuestos orgánicos. Por ejemplo: Sedimentación, filtración, maceración.
TRATAMIENTOS SECUNDARIOS	Se usa principalmente para remoción de DBO soluble y sólidos suspendidos e incluye, por ellos, los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunas y sedimentación.
TRATAMIENTOS Terciarios	Remoción de nutrientes para prevenir la eutrofización de las fuentes receptoras. Mejora la calidad de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su reuso. Por ejemplo: Filtración, Desinfección, Osmosis Inversa, Intercambio Iónico.

Fuente: GÓMEZ, Patricia. Objetivos de tratamiento. [En línea] <<https://es.slideshare.net/carodiaz7906/captulo-3-criterios-de-seleccin-para-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales>> (Citado en el 2012)

La selección de un proceso de tratamiento de aguas residuales, o de la combinación adecuada de ellos, depende principalmente de:⁹

- Las características del agua cruda
- La calidad requerida del efluente
- La disponibilidad de terreno
- Los costos de construcción y operación del sistema de tratamiento
- La confiabilidad del sistema del tratamiento
- La facilidad de optimización del proceso para satisfacer requerimientos futuros más exigentes.

1.4 MÉTODOS TERCIARIOS DE TRATAMIENTO DE AR PARA MANEJO DE IONES INDESEADOS

Existen una variedad de métodos para el mejoramiento de la calidad de agua que satisfacen las demandas actuales de agua para diversos fines, sin embargo, para el presente proyecto se necesita conocer de métodos terciarios, debido a que son procesos que juegan un papel importante en la reducción de iones, metales y metaloides que son indeseados en el agua de riego para cultivos agrícolas. Algunos de los métodos terciarios que se utilizan en la industria son descritos en los siguientes literales.

1.5 RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

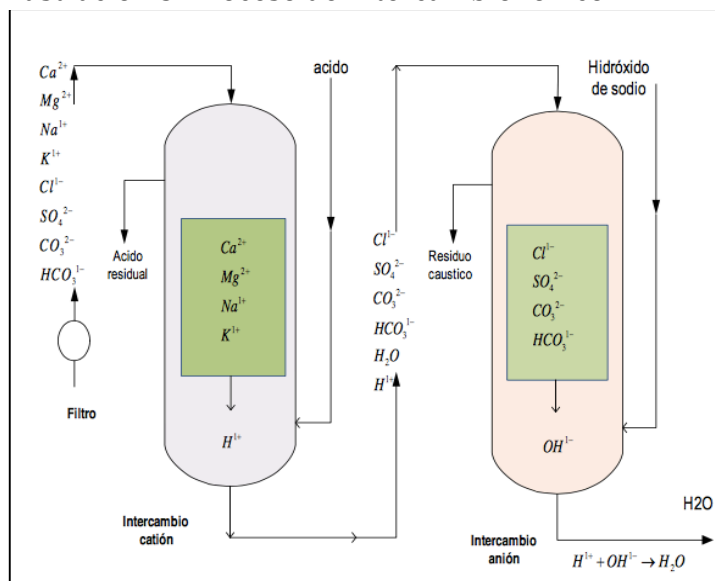
Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos capaces de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua¹⁰, están compuestas de altas concentraciones ácidas, básicas, polares u otras según la clase de iones que se quieran remover, estas concentraciones están incorporadas a una matriz de un polímero sintético y actúan intercambiando cantidades equivalentes de iones para eliminar y reemplazar aquellos que son indeseadas en el fluido a tratar, se tiene que tener en cuenta que el intercambio iónico se da entre aquellos que tengan la misma carga.

A medida que la disolución pasa a través de la resina, los iones presentes en la disolución desplazan a los que estaban originariamente en los sitios activos de la resina. La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH de la disolución, el carácter ácido o básico que tiene el grupo activo, la concentración de iones o la temperatura, entre otros.

⁹ SALAZAR, Fernando. BERMEJO, Danilo. Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales de una empresa textil.. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero industrial. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. 2013. 26p.

¹⁰ Tomado de Condorchem envitech. Resinas de intercambio iónico para el tratamiento de efluentes.

Ilustración 3. Proceso de Intercambio Iónico



Fuente: MEDINA COLLANA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. [En línea] < http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1066/1/medina_cj.pdf >

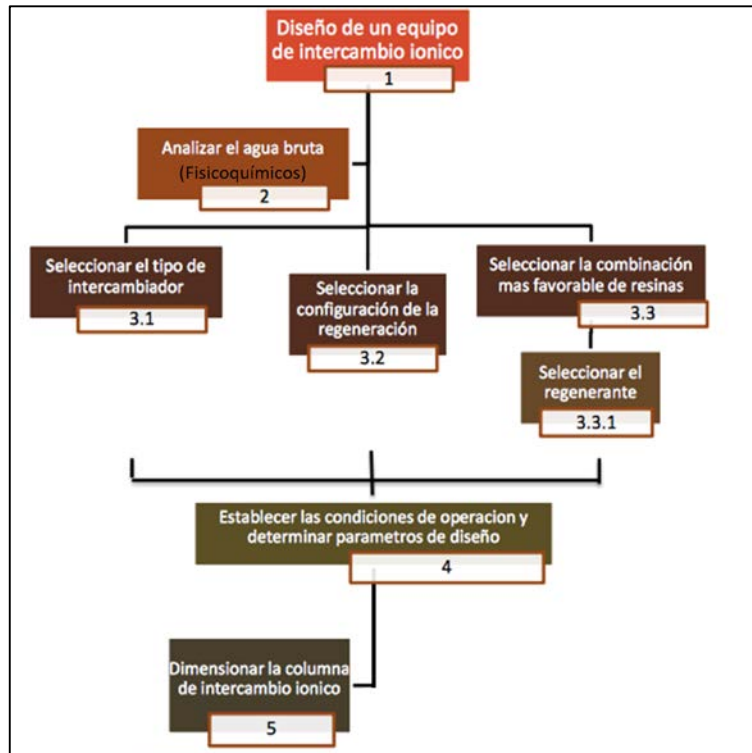
En la **Ilustración 3** se observa el mecanismo de las resinas catiónicas, la cual intercambia cationes por hidrógeno (H^{+}) y las resinas aniónicas, en donde se intercambian aniones por hidroxilos (OH^{-}) que al combinarse con el hidrógeno forman agua con contenidos menores de impurezas.

El uso de este tipo de resinas en tratamientos de agua tiene como ventaja que son procesos terciarios económicos debido a que el material intercambiador, es decir, las resinas pueden regenerarse mediante soluciones que recuperan su capacidad de intercambio. Estas soluciones de regeneración de resinas son normalmente baratas y dependen también del tipo de resina que se esté utilizando. Además, este sistema tiene buena adaptabilidad al AR que se quiere tratar sin incurrir en tecnologías que requieran de inversiones costosas, debido a que el sistema de INI puede ser automático o manual según las condiciones o necesidades específicas de la empresa. Sin embargo, en el diseño de un proceso de INI es necesario considerar los impactos ambientales de la deposición de las resinas y los tiempos que se necesitan para realizar el proceso global.

Los sistemas de INI son diseñados según la naturaleza del efluente a tratar, es decir, según las características FQ del agua residual. Generalmente son diseños sencillos, en donde se tienen que tener en cuenta además del alimento, factores como el tipo de operación favorable para el proceso, sistema de regeneración, tipo de resina,

pérdidas de cargas, entre otros. A continuación (**Ilustración 4**), se presenta un esquema de los pasos para diseñar un equipo de INI, observando que su dimensionamiento es sencillo y no se necesita de tecnologías avanzadas ni personal especializado para su diseño y funcionamiento, promocionando entonces el sistema de INI con resinas como un método eficiente y económico para ser trabajado a pequeña escala.¹¹

Ilustración 4. Diseño de un equipo de INI



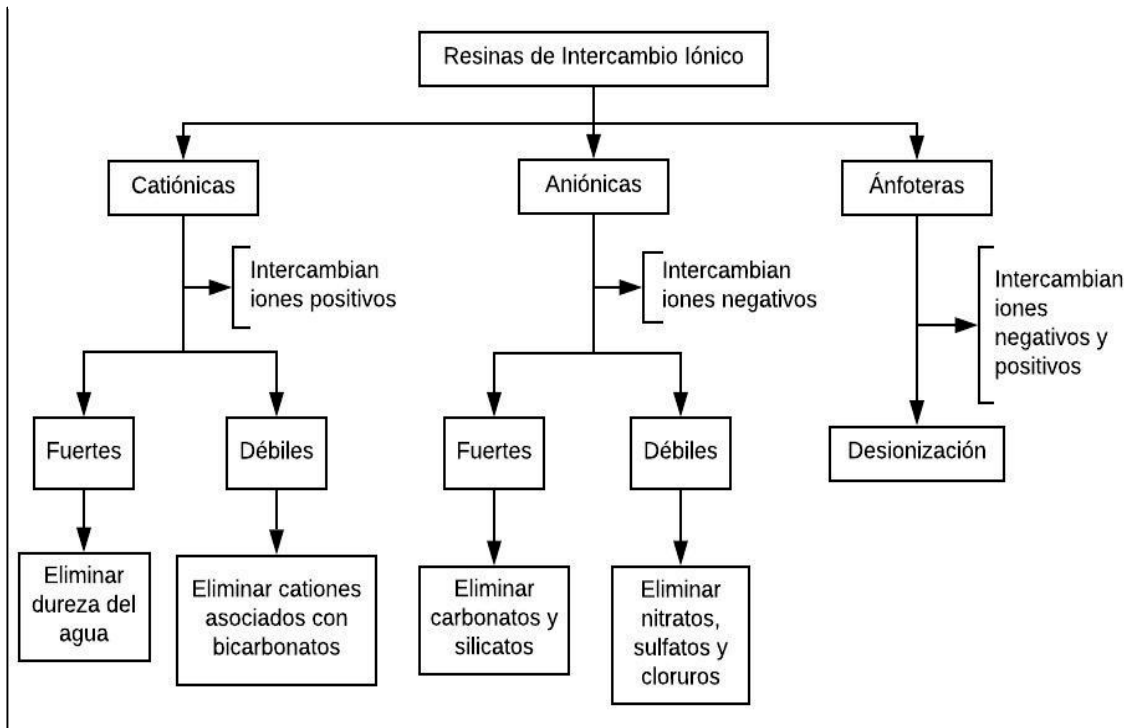
Fuente: SALVADOR, Carlos. Pasos para diseñar un equipo de intercambio iónico. [En línea] <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2797/1/Diseño%20de%20un%20sistema%20de%20intercambio%20cati%C3%B3nico_Carlos%20Agamez_USBCTG_2014.pdf> [citado el 25 de mayo del 2019)

Existe una variedad de resinas de intercambio que trabajan o son más selectivas a ciertos iones, y están en función de su estructura química. Esto puede depender del tamaño de los iones, carga o estructura¹². Las siguientes son las principales tecnologías usadas en el tratamiento de agua y purificación según el tipo de resina:

¹¹ SALVADOR, Carlos. Diseño de un sistema de intercambio catiónico de lecho fijo para la potabilización del agua en el corregimiento de Magdalena-Bolívar. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero químico. Universidad San Buenaventura, Cartagena de Indias-Colombia. 2014

¹² SERVYECO. Tratamientos por resinas de intercambio iónico. Ingeniería y equipos. Disponible en: <https://www.servyeco.com/tratamientos-por-resinas-de-intercambio-ionico.html>

Ilustración 5. Tipos de resinas de intercambio iónico



Fuente: elaboración propia

Las resinas de intercambio iónico es uno de los tratamientos terciarios conveniente para eliminar sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios como por ejemplo sulfatos y metales pesados que son de interés en nuestro proyecto, proporcionando una etapa final para aumentar la calidad del efluente para actividades agrícolas del Municipio de San Mateo y disminuir el impacto ambiental causado hasta ahora a los cuerpos de agua cercanos. Además, se puede adaptar fácilmente al tratamiento convencional y artesanal de Mina 2 LTDA, ya que no se necesita de equipos especializados en tratamientos de agua y se puede construir en las condiciones actuales de la mina sin incurrir en elevados costos a diferencia de otros de los tratamientos terciarios existentes como osmosis inversa y electrodiálisis que son procesos utilizados para objetivos de un agua mucho más pura. Otra de las ventajas que vemos en la utilización de esta operación para cumplir con los objetivos de nuestro proyecto son las características de uso en las resinas, debido a que tienen una vida útil considerable para aguas que ya han sido tratadas y al término de esta su regeneración es rápida y sin gran dificultad.

1.5.1 Clasificación de resinas de intercambio iónico. La clasificación de las resinas usadas en el mercado se diferencia con base al grupo iónico que genera la transferencia entre la solución conductora y la estructura sólida¹³, esta distinción nos permite identificar cuál de ellas son adecuadas para eliminar las concentraciones de iones sulfato que ocasionan un aumento en la propiedad de conductividad eléctrica del agua interfiriendo en la reutilización del agua en la agricultura. A continuación, se establece de una manera más amplia de las características físicas y químicas de importancia de cada una de las resinas, para concretar cuáles de ellas son útiles para la experimentación:

1.5.1.1 Resinas catiónicas fuertes. Resinas que presentan intercambio de cationes y no son susceptibles a cambios en el pH del fluido presente para el proceso, por el cual son óptimas para cualquier caso en que se desea suavizar el agua, eliminando cationes. No se puede dejar atrás la importancia que presenta este tipo de intercambiador en temas de regeneración y buen funcionamiento, por lo que se hace necesario incrementar costos en compra de regenerador, siendo así su gran y única desventaja. Como se muestra a continuación, la presencia de estas resinas, fija los cationes que se encuentran unidos a los iones cloruros, nitratos, sulfatos y silicatos¹⁴ (muy presentes en los DAM) quedando en el agua los ácidos de las sales inicialmente presentes en el agua a tratar.

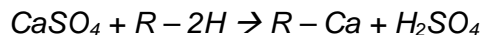
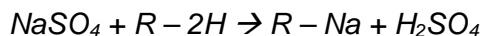
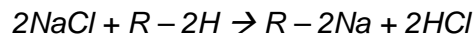
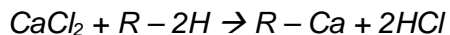
Este tipo de resinas tienen una selectividad alta hacia cationes como lo son calcio, plomo, cadmio, níquel, sodio y potasio, por lo que no son útiles para el tipo de intercambio que se necesita en el presente proyecto, ya que por el contrario se estaría concentrando más las sales en el agua residual, caso indeseado para su reutilización en la agricultura.

Por ejemplo, en la empresa Mina 2 LTDA al presentarse cloruros y sulfatos se tendría un comportamiento similar al siguiente, en donde se estaría concentrando aún más las sales presentes en el agua:

¹³ CHISCO, Juan Sebastian., CORONADO, Cesar Iván. Propuesta de un sistema de intercambio iónico para el ablandamiento de aguas, aplicada a la planta de potabilización del norte en carbones del Cerrejón Limited. Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América. 2013.

¹⁴ NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba, Ecuador. 2009. 57 p.

Reacción 1. Mecanismos de reacción de Resinas catiónicas fuertes

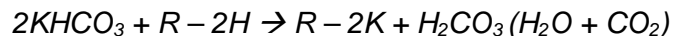
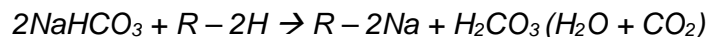
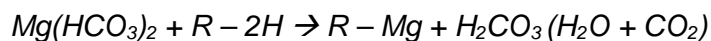
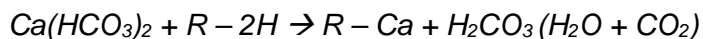


Fuente: NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas.

1.5.1.2 Resinas catiónicas débiles. Estas RII contienen grupos carboxílicos donde se presenta el intercambio con el agua. A diferencia de las presentadas anteriormente, su capacidad de intercambio es mucho menor y mantienen una limitación con pH bajos (no son útiles en este rango, se inactivan), pero esto no las hace ser un sistema ineficiente; ya que, por lo contrario, maneja eficiencia de retención mayores y en temas de regeneración y funcionamiento, no presenta incrementos en gastos a la hora de ser reactivadas nuevamente en los procesos de INI. Es importante conocer, que la capacidad de intercambio que presenta ese tipo de RII, va a depender de la velocidad de flujo que presenta el afluente en el proceso, a flujos con velocidades altas va a ser menor su capacidad de intercambio.

En temas de retención de iones, estas resinas fijan los cationes de calcio, sodio, potasio y magnesio, dejando filtrar ácido carbónico como resultado final, por lo que no son útiles para los objetivos de intercambio en el presente proyecto. Estas pueden ser usadas continuamente con las RII catiónicas fuertes y tener mejores resultados dado su afinidad de captación que las caracteriza. A continuación, se ilustra el posible comportamiento que presentaría este tipo de intercambiador (**Reacción 3**):

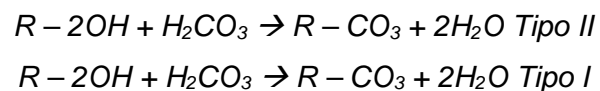
Reacción 2. Mecanismos de reacción de Resinas catiónicas débiles



Fuente: NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas.

1.5.1.3 Resinas aniónicas fuertes. Este conjunto de resinas es más complejo al presentar una derivación hacia dos grupos de RII de tipo 1 y 2, diferenciándose en la funcionalidad de captación frente a la depuración de contaminantes y su respectivo intercambio de aniones (iones negativos) para el ablandamiento o suavizado del afluente frente a su tratamiento dispuesto. Al igual que cualquier alternativa propuesta hasta el momento, se presentan inconvenientes hacia su utilización frente a la adquisición del agente “regenerante”, debido a que limita su uso en uno solo denominado “sosa” (soda caustica) e igualmente presenta la necesidad de consumo en gran cantidad de este componente. Independientemente del tipo de resina utilizada, esta especie presenta un intercambio de amonio cuaternario y ya en su funcionalidad, la resina de tipo I presenta tres grupos metilos y son adecuados para la remoción total de aniones y sílice, son resistentes a las altas temperaturas y pueden ser usadas en aguas altamente alcalinas y con alto sílice, mientras que la resina tipo II presenta un etanol y dos metilos en el sitio de intercambio, dando buenos resultados en aguas que contienen predominantemente minerales ácidos libres, cloruros y sulfatos, pero posee menos estabilidad a altas temperaturas¹⁵. A continuación, se ostenta la diferencia entre estos dos tipos de RII:

Reacción 3. Mecanismos de reacción de Resinas aniónicas fuertes



Fuente: NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas.

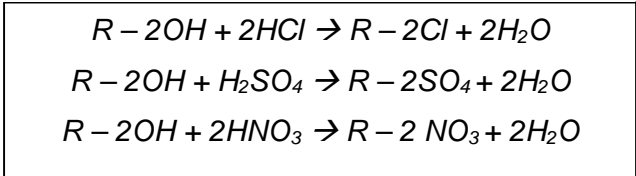
Para el caso de la sociedad LTDA., se presenta un flujo de 1,5 m³ por día, y un pH óptimo de 8 - 8.5 lo que la haría muy útil frente a los objetivos requeridos para esta investigación, ya que se estaría intercambiando los iones de interés para poder reducir cantidad de sales en el agua y así mismo la conductividad del agua residual.

¹⁵ NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba, Ecuador. 2009. 59 p.

1.5.1.4 Resinas aniónicas débiles. Dada su operatividad al tipo de resina previamente mencionado, el sitio de intercambio es ocupado por el grupo funcional poliamida la cual presenta afinidad por los ácidos fuertes dando una adsorción efectiva. No se puede dar uso en fuentes hídricas con pH altos ya que por efectos químicos presentaría oxidación y ensuciamiento que perpetuaría su desactivación. No obstante, esta resina es bien utilizada en aguas con elevados contenidos de sulfatos y cloruros, que influyen en la alta presencia conductiva en la fuente hídrica tratada y que es de gran importancia en el DAM presente en Mina 2 Ltda. Se diferencia de la resina aniónica fuerte por dos motivos principales:

- No generan depuración del silicio y alcalinidad de la fuente hídrica
- Requiere menos cantidad de regenerante “sosa”

Reacción 4. Mecanismos de reacción de Resinas aniónica débiles



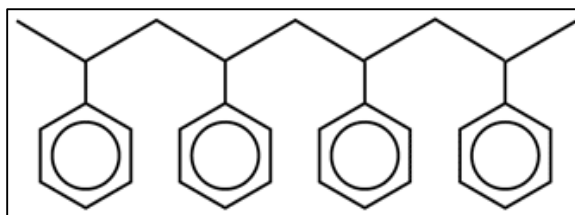
Fuente: NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas.

Este tipo de resinas serían de gran utilidad para la reducción sales en el agua residual de Mina 2 LTDA para adaptarla para uso en la agricultura, ya que fijan los aniones de los ácidos fuertes como sulfatos, cloruros y nitratos en las resinas, provocando un aumento en la calidad del agua residual.

1.5.2 Estructura de las resinas

1.5.2.1 Matriz polimérica. Alrededor del 90% de todas las RII se basan en una matriz poliestirénica pseudocristalina, conformado por múltiples unidades del monómero de estireno con un compuesto aromático también llamado vinil benceno que permite la polimerización. Las cadenas de polímeros lineales resultantes están enredadas, pero tienen poca resistencia física, son relativamente suaves y después de la activación, probablemente se disolverían en agua. En la Ilustración 6, se encuentra esquemáticamente una simplificación de la cadena de poliestireno:

Ilustración 6. Cadena simplificada de poliestireno

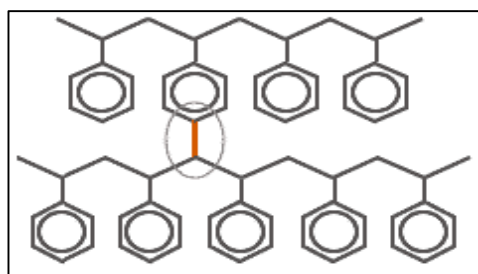


Fuente: DARDEL.François Ion exchange resin structure. Resin Matrix [En línea]<
http://dardel.info/IX/resin_structure.html > [citado el 05 de marzo del 2019]

1.5.2.2 Agente de entrecruzamiento. Para dar al polímero una estructura tridimensional más estable, las cadenas de poliestireno están reticuladas con otra molécula en el momento de la polimerización. La molécula más común de reticulación es el divinilbenceno (DVB) y está distribuido uniformemente en toda la matriz.

La **Ilustración 7** se evidencia en rojo el enlace de la molécula DVB, la cual se une a la siguiente cadena de poliestireno lineal, formando entonces las perlas esféricas, entre más DVB se agrega a la mezcla de reacción inicial, más rígido es el polímero.

Ilustración 7. Cadena de poliestireno



Fuente: DARDEL.François. Ion exchange resin structure. Resin Matrix [En línea]<
http://dardel.info/IX/resin_structure.html > [citado el 05 de marzo del 2019]

1.5.2.3 Grupo funcional. Una vez obtenido el polímero se debe activar para convertirlas en RII, en el siguiente cuadro se observan las activaciones químicas para cada tipo de resina:

Cuadro 2. Activación de los tipos de resina

TIPO DE RESINA	ACTIVACIÓN
Catiónicas fuertes	<ul style="list-style-type: none">• Reacción de sulfonación
Aniónicas fuertes	<ul style="list-style-type: none">• Clorometilación• Aminación con amina terciaria
Aniónicas débiles	<ul style="list-style-type: none">• Clorometilación• Aminación con amina secundaria
Catiónicas débiles	<ul style="list-style-type: none">• Hidrólisis con ácido sulfúrico• Hidrólisis con soda cáustica

Fuente: NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas.

1.5.3 Propiedades de las resinas

1.5.3.1 Tamaño de partícula. El tamaño estándar varía entre partículas con un diámetro entre 0,3 y 1,2 mm, sin embargo, se pueden encontrar con tamaños mayores o menores según la necesidad.¹⁶ Existe una relación indirecta entre la velocidad de intercambio y las caídas de presión con el tamaño de la partícula, ya que entre más pequeñas sean mayor va a ser la velocidad de INI y van a haber mayores pérdidas de presión.

1.5.3.2 Solubilidad. Las RII son conocidas por ser insolubles en agua bajo operaciones normales, debido a que son poliácidas poli-bases de alto peso molecular, sin embargo, a ciertas temperaturas y con altos tiempos de residencia pueden ser solubles y terminan hinchándose.

¹⁶ NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba, Ecuador. 2009. 66 p.

1.5.3.3 Forma. Las resinas son gránulos esféricos que deben ser uniformes y tener máxima homogeneidad para que haya un buen INI, y que las pérdidas permanezcan aceptables. El aspecto óptico proporciona información útil sobre problemas potenciales de funcionamiento, ya que estas pueden estar agrietadas más no rotas.

1.5.3.4 Densidad. Esta propiedad en las resinas comúnmente se expresa por la densidad húmeda en los cuales se evidencia. En la **Tabla 1** se evidencia la densidad húmeda de los diferentes tipos de resinas:

Tabla 1. Densidades de tipos de resinas

Resinas catiónicas fuertes	1,18 g/L – 1,38 g/L
Resinas catiónicas débiles	1,13 g/L – 1,20 g/L
Resinas aniónicas fuertes	1,07 g/L – 1,12 g/L
Resinas aniónicas débiles	1,02 g/L – 1,10 g/L

Fuente: NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas.

1.5.3.5 Caída de presión. Es un aspecto muy importante a la hora de diseñar equipos, en donde se relaciona el tamaño, la forma, la uniformidad, la compresibilidad de las partículas, la viscosidad, la temperatura y tasa de flujo utilizada.¹⁷

1.5.3.6 Resistencia a la fractura. Para el uso de las RII, el agua a ser ionizada debe estar libre de material suspendido y coloidal, ya que esto conllevaría a problemas de obstrucción y pobre distribución, reduciendo la capacidad y disminución de su vida.¹⁸ Durante el proceso de agotamiento y regeneración de la CI de las resinas no debe ser causante de que se revienten los gránulos.

¹⁷ NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba, Ecuador. 2009. 68 p.

¹⁸ Ibid., p.68.

1.5.3.7 Estabilidad de las resinas. Las resinas durante su funcionamiento sufren varias formas de estrés, según las condiciones con el que se esté trabajando, por esta razón los proveedores de ofrecen diferentes tipos de resinas adaptadas a diferentes condiciones de uso. Los tipos de estrés que evidencian las resinas son:

- Mecánico: Por transporte de resina de una columna a otra ocasionando ruptura de partículas, pérdida de carga elevada
- Osmótico: Variaciones de volumen de las bolas individuales de resina por ensuciamiento
- Térmico: Variaciones fuertes de temperatura
- Envenenamiento por materias orgánicas

1.5.3.8 Selectividad. La selectividad de las resinas se refiere a la preferencia que tienen a ciertos iones que poseen unas cargas similares, esta propiedad depende de los siguientes factores:

- Carga y tamaño del ion: Prefiere contra-iones de elevada valencia
- Presión de hinchamiento
- Interacción iónica
- Volumen de la disolución

1.5.4 Cinética de los procesos de intercambio iónico. El proceso de intercambio iónico está regulado por las diferencias de concentraciones que existen entre las fases líquida y sólida del sistema, además del tiempo de difusión que se requiere para que ambas fases estén en equilibrio iónico, el mecanismo de transferencia de iones está controlado por difusión en 3 etapas¹⁹:

- Transferencia desde el seno de la solución hasta la capa límite que rodea la esfera. Proceso independiente al tamaño de la esfera.
- Transferencia desde la capa límite hasta la superficie de la esfera, siendo la velocidad de transferencia inversamente proporcional al radio de la esfera.
- Transferencia del ion hacia el interior de la esfera de la resina, siendo la velocidad inversamente proporcional a $1/r^2$

Por lo tanto, optar por menores tamaños de partículas de las resinas (0,55 +/- 0,05 mm), favorece el proceso de difusión e intercambio iónico, reduciendo el tiempo de residencia entre ambas fases y el proceso de regeneración.

¹⁹ SANCHEZ, Concepción. Ficha técnica de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Universidad Da Coruña. Septiembre de 2015. p 8.

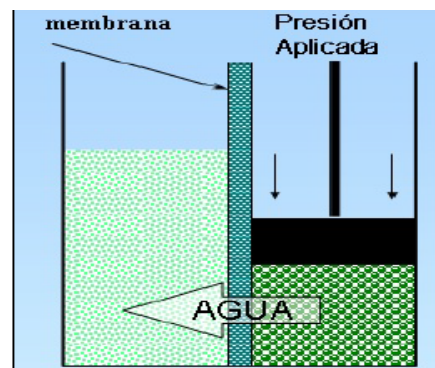
1.6 OSMOSIS INVERSA

La osmosis inversa es una tecnología de tratamiento de aguas residuales que utiliza una presión aplicada al agua salada, para vencer la presión osmótica de ambas soluciones, provocando que partículas del agua pura pasen a través de una membrana semipermeable, que permite el paso de componentes más pequeños en la solución, más no de la mayor parte de sales disueltas en el efluente, siendo esta membrana impermeable a ciertos iones y a partículas más grandes en el agua potable, sistema que se evidencia en la **Ilustración 8**.

En un sistema de osmosis inversa hay tres soluciones principales²⁰:

- Alimentación: es la solución de agua que llega a las membranas de osmosis inversa previamente presurizada por la bomba de alta presión. Esta corresponde al AR que se quiera tratar con el proceso.
- Permeado: es la solución que se obtiene al otro lado de la membrana, después de atravesarla, es decir, es el agua pura que tiene bajo contenido de sales y sólidos disueltos. La cantidad de permeado dependerá de la diferencia de presiones aplicada a la membrana, sus propiedades y la concentración del agua bruta²¹.
- Rechazo: es la solución más concentrada en sales, que no puede atravesar la membrana.

Ilustración 8. Mecanismo de Osmosis Inversa



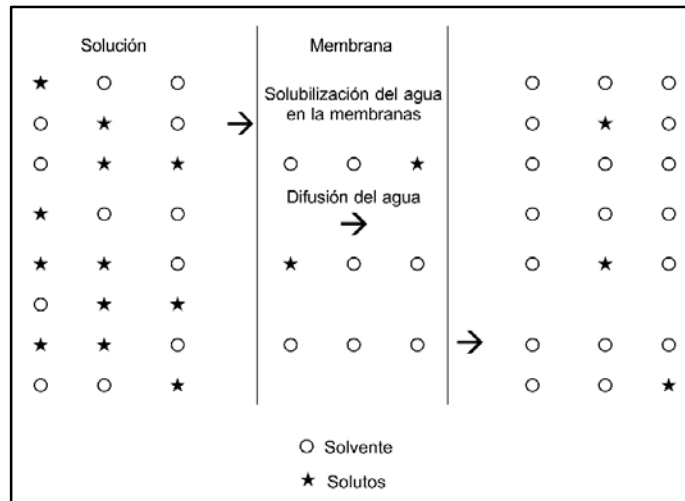
Fuente: LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo I. Introducción teórico.

²⁰LOPEZ, María. Diseño de una planta de tratamiento de agua potable por osmosis inversa para un buque de pasaje. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero Marítimo. Universidad Cantabria, 2015 24p

²¹ Ibid., p.25.

1.6.1 Transporte a través de las membranas de osmosis inversa. El modelo que se usa para realizar la osmosis inversa es el de difusión. Según este modelo, cada componente de la solución a tratar se disuelve en la membrana según las leyes de distribución y equilibrio conocidas, difundiendo, debido a las diferencias de concentración y de presión existentes a ambos lados de la membrana.²²

Ilustración 9. Modelo de difusión



Fuente: LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo IV. Transporte a través de las membranas.

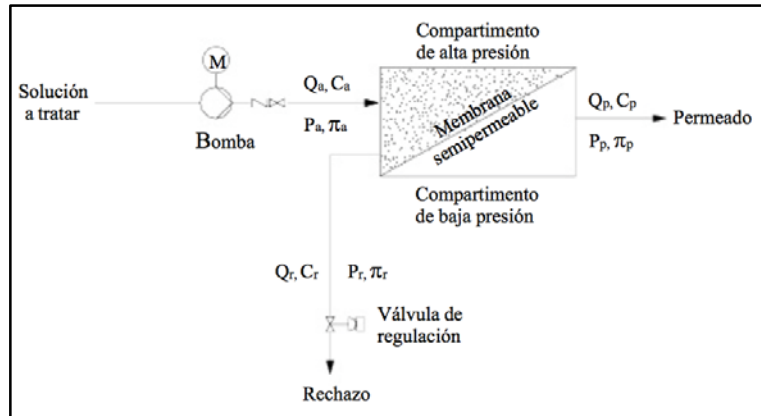
En la **Ilustración 9** se representa el mecanismo de difusión utilizado en la operación de osmosis inversa que, a causa de un diferencial de presión, existe una destrucción de puentes de hidrógeno entre las moléculas polares, provocando que las moléculas de solvente pasen a través de la membrana, concentrando las sales de la solución en un lado de la membrana y al otro lado obteniendo un permeado.

En la **Ilustración 10** se observa un esquema básico del proceso industrial de una ósmosis inversa, el cual al tratarse de un procedimiento no natural es necesaria la acción externa de una bomba, que envía la solución a tratar hacia una membrana semipermeable manteniendo una elevada presión en uno de sus lados, con lo que una parte del solvente y una cantidad muy pequeña del soluto atraviesan la membrana²³. Sumado a esto se dispone de una válvula de regulación situada en la tubería de rechazo, con la finalidad de controlar el porcentaje de solución que es convertida en permeado.

²² LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo IV. Transporte a través de las membranas. p 22. [En línea:] <https://www.academia.edu/33143037/ANEJO_2_INTRODUCCIÓN_A_LA_OSMOSIS_INVERSA>

²³ Ibid., p 2.

Ilustración 10. Proceso industrial de Osmosis Inversa



Fuente: LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo I. Introducción teórico.

1.6.2 Clasificación de las membranas de Osmosis Inversa. Existe una variedad de membranas²⁴ utilizadas para sistemas de osmosis inversa, en donde su selección depende del tipo de agua que se quiera tratar y los resultados que se esperan una vez se utilice el proceso.

1.6.2.1 Según su estructura.

Cuadro 3. Clasificación según su estructura

<i>Simétricas</i>	<i>Asimétricas</i>
Estructura porosa uniforme en todo su espesor, presentan una elevada permeabilidad al solvente y bajo rechazo de sales, por lo que no son usadas para sistemas de osmosis inversa	Presenta una capa densa y delgada (Capa Activa) que impide el paso del soluto y también una capa de soporte para ofrecer resistencia.

Fuente: LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo I. Introducción teórico.

²⁴ LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo II. Membranas de osmosis inversa. p 9. [En línea:] <https://www.academia.edu/33143037/ANEJO_2_INTRODUCCIÓN_A_LA_OSMOSIS_INVERSA>

1.6.2.2 Según su forma

Cuadro 4. Clasificación según su forma

Planas	Tubulares	Fibra hueca
La capa activa es plana, para adoptarla en distintas formas según la función de la técnica	Son construidas en forma de hueco, en donde en la parte inferior del tubo se ubica la capa activa	Tiene la forma de un tubo capilar hueco en donde se dispone de en la parte exterior la capa activa

Fuente: LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo I. Introducción teórico.

1.6.2.3 Según la composición química.

Cuadro 5. Clasificación según composición química

Neutras	Catiónicas	Aniónicas
No presentan ninguna carga eléctrica	Su superficie tiene carga eléctrica positiva	Sobre su superficie tienen carga eléctrica negativa

Fuente: LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo I. Introducción teórico.

1.6.2.4 Según la carga superficial.

Cuadro 6. Clasificación según la carga superficial

Integrales	Capa fina
La capa activa y el lecho soporte tienen la misma composición química, solo difieren en el aumento progresivo de la porosidad	La capa activa y el soporte son de diferentes materiales, proporcionando que cada capa pueda optimizarse por separado, adecuando para un resultado específico

Fuente: LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo I. Introducción teórico.

Estas cargas dependen de la naturaleza del polímero y también del pH de la solución de aporte.

1.6.2.5 Según su naturaleza.

Cuadro 7. Clasificación según su naturaleza

Orgánicas	Inorgánicas
Acetato de celulosa	Cerámicas
Triacetato de celulosa	Vidrios
Poliamidas aromáticas	Fosfacenos
Poliéter-Urea	Carbonos
Poliacrilonitrilo	
Polifunado sulfonado	

Fuente: LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo I. Introducción teórico.

1.6.2.6 Según la presión de trabajo.

- Muy baja presión: Trabajan entre 5 y 10 bares. Utilizadas para tratar aguas residuales con bajas concentraciones de sal entre 500-1500 mg/L
- Baja presión: Trabajan entre 10 y 20 bares. Utilizadas para eliminar sales de aguas entre 1500-4000 mg/L y reducir contenidos de nitratos.
- Media presión: Trabajan entre 20 y 40 bares. Se utilizan para tratar aguas con alto contenido de sales entre 4000-10000 mg/L.
- Alta presión: Utilizadas para obtener agua potable a partir de agua del mar. Trabajan entre 50 y 80 bares.

1.6.3 Módulos. Un módulo es una agrupación de membranas con una configuración determinada, que forma la unidad elemental de producción.²⁵ Para obtener un máximo rendimiento en los sistemas de osmosis inversa, es necesario que las membranas se organicen en módulos con la finalidad de que puedan soportar las presiones de trabajo utilizadas en el proceso. En la *Tabla 9* se evidencian una tabla comparativa entre los tipos de configuraciones o módulos que se usan actualmente en un sistema de osmosis inversa.

Para la utilización de este sistema es necesario que el agua cruda o agua a tratar reciba un pre-tratamiento físico y químico, con el fin de proteger la membrana de posibles deposiciones o suciedad. La construcción de una planta típica de osmosis inversa implica una instalación compleja, debido a que, debe estar compuesta no solo por la membrana semipermeable que va a permitir el flujo de agua pura, sino

²⁵ LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo III. Módulos. p 31. [En línea:] <https://www.academia.edu/33143037/ANEJO_2_INTRODUCCIÓN_A_LA_OSMOSIS_INVERSA>

también, de una cámara de presión, una bomba de alta presión y tratamientos posteriores al proceso osmótico, en donde hay un ajuste de parámetros y desinfección del agua que atraviesa las membranas y del agua de rechazo, la cual tiene una alta concentración de sólidos y sales disueltas. Características que hacen de la osmosis inversa un proceso de una alta inversión, debido a gastos energéticos, mano de obra, productos químicos, reposición de membranas, mantenimiento, entre otros²⁶.

Tabla 2. Tipos de módulos y sus características

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE MODULO				
	De placas	Tubular	Espiral	Fibra hueca	
Superficie de membrana por módulo (m ²)	15 - 50	1,5 - 7	30 - 40	370 - 575	
Volumen de cada módulo (m ³)	0,30 - 0,40	0,03 - 0,1	0,03	0,04 - 0,08	
Caudal por módulo (m ³ /día)	9 - 50	0,9 - 7	30 - 38	10 - 70	
Grado de compactación (m ³ de membrana por m ²)	50 - 125	50 - 70	1.000 - 1.100	5.000 - 14.000	
Productividad por unidad de superficie (m ³ /día por m ²)	0,6 - 1	0,6 - 1	1 - 1,1	0,1 - 0,15	
Productividad por unidad de volumen (m ³ /día por m ³)	30 - 125	30 - 70	1.000 - 1.250	9.000 - 1.500	
Conversión de trabajo por módulo (%)	10	10	10 - 50	30 - 50	
Pérdida de carga por tubo de presión (bar)	2 - 4	2 - 3	1 - 2	1 - 2	
Tolerancia frente a sustancias coloidales	Mala	Buena	Mala	Mala	
Tolerancia frente a materia en suspensión	Mala	Buena	Mala	Muy mala	
Comportamiento frente a las limpiezas	Mecánicas	Regular	Bueno	No aplicable	No aplicable
	Químicas	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
	Agua a presión	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno
Pretratamiento necesario	Coagulación + filtración (5 µm)	Filtración	Coagulación + filtración (5 µm)	Coagulación + filtración (1 µm)	
Aplicaciones	Alimentación	Alimentación	Desalación aguas salobres y de mar	Desalación aguas salobres y de mar	
	Líquidos poco cargados	Aguas residuales y líquidos cargados	Obtención de aguas de alta pureza	Obtención de aguas de alta pureza	
	Concentración y recuperación de sustancias	Concentración y recuperación de sustancias	Concentración y recuperación de sustancias. Aguas residuales y líquidos poco cargados	Concentración y recuperación de sustancias	

Fuente: LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo III. Módulos.

²⁶ CABEZAS, Emanuel. Externalidades ambientales en la aplicación de osmosis inversa para potabilización de agua solo para la ingesta. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Tecnológica Nacional , 2013 49p

1.6.4 Ensuciamiento de las membranas. Es necesario que a las AR se les realice filtración o demás pretratamientos según el tipo de efluente que se esté manejando, esto con el objetivo de eliminar las sustancias que puedan depositarse sobre las membranas o en el interior de los módulos del sistema de osmosis inversa, disminuyendo la productividad y aumento del paso de sales por la membrana. Es posible realizar una limpieza a las membranas que han sido contaminadas con sustancias a causa de inadecuados pretratamientos, sin embargo, al realizar esta limpieza con frecuencia, se está acelerando su deterioro y reduciendo su vida útil.

1.6.4.1 Causas del ensuciamiento.

- Precipitaciones: Sales minerales si superan sus productos de solubilidad y óxidos metálicos susceptibles de precipitar²⁷.
- Depósitos: Pueden deberse a partículas de gran tamaño, coloides y desarrollo biológico.
- Otros: Son aquellos que pueden presentarse, pero son ensuciamientos extraños, de este tipo de categoría están compuestos orgánicos y aceites y grasas.

1.6.4.2 Técnicas de limpieza. Para detectar el ensuciamiento de las membranas es necesario observar la evolución con el tiempo de parámetros como el estado del paso de sales, pérdida de carga, presión de alimentación y caudales de rechazo en condiciones estacionarias, de forma que los valores sean comparables entre sí ²⁸. Las limpiezas de las membranas pueden ser a partir de los siguientes mecanismos:

- Limpieza mecánica: Consta de utilizar una esponja para desprender la suciedad depositada mecánicamente en la superficie activa de las membranas.
- Limpieza con permeado a presión: Consiste en hacer pasar por la membrana un permeado exento de sustancias en suspensión y disueltas²⁹.
- Limpieza química: consiste en recircular productos químicos capaces de disolver las partículas de ensuciamiento y eliminar los depósitos.

²⁷ LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo V. Ensuciamiento de las membranas. p 32. [En línea:] <https://www.academia.edu/33143037/ANEJO_2_INTRODUCCIÓN_A_LA_OSMOSIS_INVERSA>

²⁸ Ibid., p.34.

²⁹ Ibid., p.36.

Los impactos ambientales de la construcción de un sistema de osmosis inversa pueden ocurrir en tres periodos distintos: construcción, operación y desmantelamiento³⁰:

- Impactos en la construcción: excavación del terreno, producción de materiales y equipos de construcción, transporte de dichos materiales, entre otros.
- Operación: consumo de electricidad, químicos, producción y disposición de membranas, descarga del agua de rechazo, entre otros.
- Desmantelamiento: demolición de estructuras edilicias, transporte y disposición de los materiales.

La tecnología de osmosis inversa es una de las más avanzadas en cuanto a purificación del agua, pero como en todos los procesos tiene sus ventajas y desventajas. Mediante el tratamiento y gracias a la permeabilidad de las membranas usadas se pueden eliminar entre el 96 y el 99% de la mayoría de los contaminantes, incluidas sales y minerales, colorantes, partículas, bacterias y metales peligrosos³¹, obteniendo una alta calidad del AR con una salinidad muy baja y con reducción notoria de nitratos, carbonatos, sulfatos, entre otros, sin embargo, hay que tener en cuenta que no se puede eliminar todos los contaminantes y que algunos minerales alcalinos beneficiosos en el agua a tratar pueden eliminarse mediante este sistema, lo que hace un agua más ácida. Este sistema de tratamiento como se habló anteriormente requiere de una bomba de alto grado, que al ser más pequeña genera poca cantidad de permeado (producto limpio y purificado) al agua residual, provocando que sea un proceso bastante lento y con un alto gasto energético. Esto hace que este método se vuelva ineficaz y no práctico si se va a trabajar en plantas a escala más pequeña, en donde se pueden usar otros métodos convencionales que tienden ser más efectivos en estos casos.

1.7 ELECTRODESIONIZACIÓN

La electrodesionización es una nueva tecnología usada para el tratamiento de AR que combina la electrodiálisis y el intercambio iónico, resultando en un proceso que elimina de manera efectiva los iones del agua a la vez que las resinas de intercambio iónico son continuamente regeneradas por una corriente eléctrica³². A este sistema lo componen una resina de intercambio iónico y dos membranas, una catiónica y una aniónica que sirven como empaquetamiento de la resina, ubicadas en una cámara de desionización.

³⁰ CABEZAS, Emanuel. Externalidades ambientales en la aplicación de osmosis inversa para potabilización de agua solo para la ingesta. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Tecnológica Nacional , 2013 51p

³¹ PURE AQUA INC. Sistemas de osmosis inversa y su seguimiento en tratamiento de aguas. [En línea] < <https://es.pureaqua.com/que-es-la-osmosis-inversa/> > [citado el 03 de febrero del 2019]

³² LENNTECH. Electrodesionización, utilidad, ventaja y aplicaciones [En línea] <<https://www.lenntech.es/edi.htm#ixzz5pBspM1bM> > [citado el 03 de febrero del 2019]

El mecanismo de operación en este sistema empieza con la entrada del AR a tratar que pasa a través de las membranas y de la resina mientras una fuente de corriente suministra un campo de corriente continua por medio de unos electrodos a través de la resina que arrastra a los cationes hacia el cátodo y a los aniones hacia el ánodo³³, eliminándolos del agua de entrada, transfiriéndolos al agua concentrada que sale de las dos membranas utilizadas en el intercambio, produciendo agua altamente pura y desionizada.

El proceso de electrodesionización puede realizarse por dos mecanismos: Batch y Continuo. El proceso Batch requiere de un tiempo de operación entre 90 minutos y 6 horas según la concentración inicial del agua y la calidad del producto que se desea con la operación, y el proceso continuo requiere de una variedad de membranas de intercambio, estos dos procesos requieren de una construcción con rectificador, la unidad de electrodesionización, válvulas, bombas, medidores de flujo y tanques de soluciones³⁴, por lo que lo hace ser un proceso más costoso que los planteados anteriormente.

La Electrodesionización produce una corriente de salida de agua de una alta calidad, usando una menor cantidad de productos químicos que la tecnología convencional de intercambio iónico, debido a que la regeneración de la resina usada se realiza con corriente eléctrica, haciendo este sistema un proceso totalmente continuo, sin necesidad de un control extremo en el manejo de secuencia de válvulas que necesitan de la atención de un operador. Sin embargo, no se puede usar en aguas de dureza superior a 1 ppm, ya que el carbonato de calcio crearía una costra en la cámara del concentrado, limitando su operación³⁵, por lo que se necesita de una purificación previa de la alimentación al sistema, incurriendo en costos operacionales del proceso, además hay un consumo energético mayor que en el uso de las otras dos alternativas estudiadas.

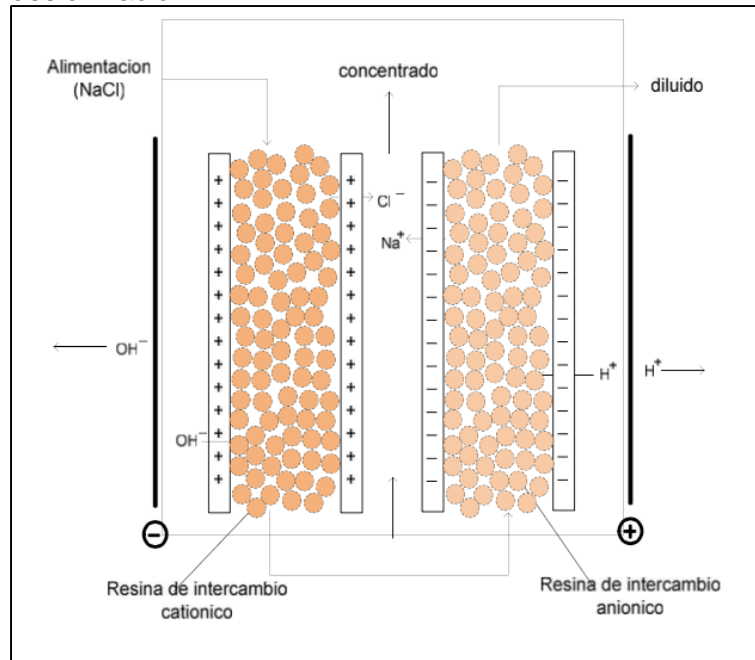
³³ LENNTECH. Electrodesionización, utilidad, ventaja y aplicaciones [En línea] <<https://www.lenntech.es/edi.htm#ixzz5pBspM1bM> > [citado el 03 de febrero del 2019]

³⁴ MEDINA COLLANA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería química y textil. Tesis para optar por el grado académico de maestro en Ingeniería de procesos. Lima-Perú. 2009. p 72. [En línea] < http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1066/1/medina_cj.pdf >

³⁵ LENNTECH. Op. Cit., p. 2.

1.7.1 Equipo de electrodesionización. El equipo del mecanismo de electrodesionización contiene internamente membranas semipermeables aniónicas y catiónicas alternadas, y entre ellas unos espacios, llamadas cámaras que están rellenas de resinas de intercambio iónico, para permitir la entrada y salida del agua residual que se está tratando. En la *Ilustración 11* se distinguen dos tipos de cámaras, la de concentrado y la de permeado, la primera corresponde al lugar donde se acumulan los iones que atraviesan las membranas semipermeables y la otra donde permanece el agua que ha sido purificada.

Ilustración 11. Unidad del equipo de Electro desionización



Fuente: MEDINA COLLANA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. [En línea] < http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1066/1/medina_cj.pdf >

Al aplicar en los electrodos una corriente eléctrica, se produce el movimiento de iones: los aniones hacia el ánodo y los cationes hacia el cátodo. Los aniones pueden atravesar las membranas permeables a los aniones, pero no las permeables a los cationes. De la misma manera, los cationes pueden atravesar las membranas permeables a los cationes, pero no las permeables a los aniones. Estos iones atraviesan las membranas y entran en la cámara de concentrado. Una vez dentro de las cámaras de concentrado, los cationes no pueden continuar hacia la siguiente

cámara de permeado gracias a la membrana aniónica que lo repele, y lo mismo ocurre con los aniones y la membrana catiónica.³⁶

Una de las ventajas de este mecanismo a diferencia de los anteriores vistos es que la corriente eléctrica aplicada para realizar el proceso ayuda a regenerar las resinas de forma continua, debido a que se produce la disociación del agua formando iones Hidrógeno (H^+) y iones hidroxilo (OH^-), y por lo tanto no está la necesidad de utilizar productos químicos para la regeneración de las RII, sin embargo esta regeneración a partir de la corriente eléctrica no ofrece la misma calidad de limpieza y por lo tanto las exigencias de la calidad del agua de alimento es más estricta que en los otros procesos terciarios consultados.

1.7.2 Elementos de la celda de electrodiálisis.

- **Electrodos:** corresponden a dos placas rectangulares de diferente material metálico, resistente a la corrosión y a la deposición de películas orgánicas no conductoras.³⁷ Estas placas son metálicas debido a que son materiales altamente conductivos, que por lo tanto facilitarían la distribución de corrientes y potencial aplicada al proceso de electrodesionización.
- **Espaciadores:** corresponden a una malla de material plástico que se ubican entre cada par de membranas, con el fin de evitar deposiciones de materiales en la superficie de las membranas y homogenizar la concentración.³⁸
- **Celda de concentración:** la celda de concentración es aquella en donde se sitúan los iones (aniones o cationes) que fueron transportados a través de las membranas por efecto de la corriente eléctrica, formando una solución electrolítica concentrada. Es importante tener en cuenta que si supera el límite de la concentración de iones calcio, carbonatos y sulfatos en la celda, estos pueden precipitar en las membranas y aumentar su resistencia eléctrica y disminuir su selectividad.³⁹

³⁶ ARNAU, César. Diseño de una planta de producción de agua de proceso para una central térmica de ciclo combinado. Universidad Jaime I. Escuela superior de tecnología y ciencias experimentales. Julio de 2015. Capítulo 6. Análisis de soluciones. p 36. [En línea:] <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/137693/TFG_2015_ArnauSegarraC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

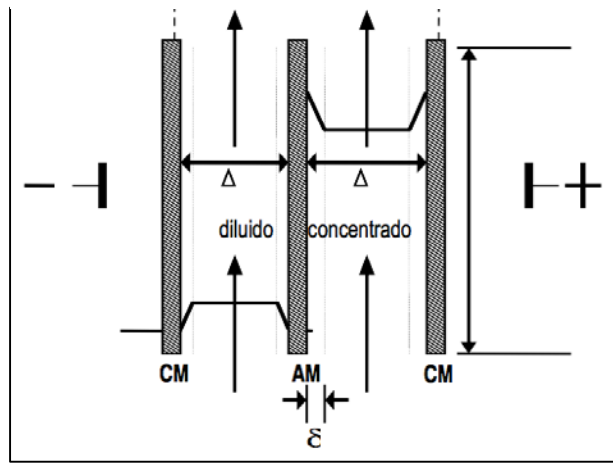
³⁷ MEDINA COLLANA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería química y textil. Tesis para optar por el grado académico de maestro en Ingeniería de procesos. Lima-Perú. 2009. p 66. [En línea] <http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1066/1/medina_cj.pdf>

³⁸ Ibid., p. 68

³⁹ Ibid., p. 71

- **Celda de dilución o permeado:** es la celda en donde se obtiene el producto deseado, es decir, un agua con bajos niveles de impurezas.
- **Par de celda:** Es el elemento básico para construir una pila de electrodesionización compuesto por membranas de Intercambio catiónico, Espaciador del diluido, Celda de dilución, membrana de intercambio aniónico, espaciador del concentrado y celda de concentración.⁴⁰ En la **Ilustración 12** se puede observar un esquema de un par de celda común de estos equipos.

Ilustración 12. Par de celda



Fuente: MEDINA COLLANA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. [En línea] < http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1066/1/medina_cj.pdf >

Donde:

CM: Membrana de intercambio catión

AM: Membrana de intercambio anión

⁴⁰ MEDINA COLLANA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería química y textil. Tesis para optar por el grado académico de maestro en Ingeniería de procesos. Lima-Perú. 2009. p 69. [En línea] < http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1066/1/medina_cj.pdf >

1.7.3 Disposición de las membranas. Las celdas de electrodiálisis están conformadas como se dijo anteriormente por dos tipos de membranas, una catiónica y otra aniónica, colocadas en paralelo y en forma alterna, ellas se encuentran entre un par de electrodos. La ubicación de las membranas de esta manera permite que se formen dos compartimientos o cámaras, como se nombraron anteriormente: concentrado y permeado o de dilución. En los extremos se ubican otros espacio o cámaras, denominadas celdas de lavado, que se encuentran en contacto con los dos electrodos (ánodo y cátodo).

Ilustración 13. Celdas de la unidad de electrodesionización

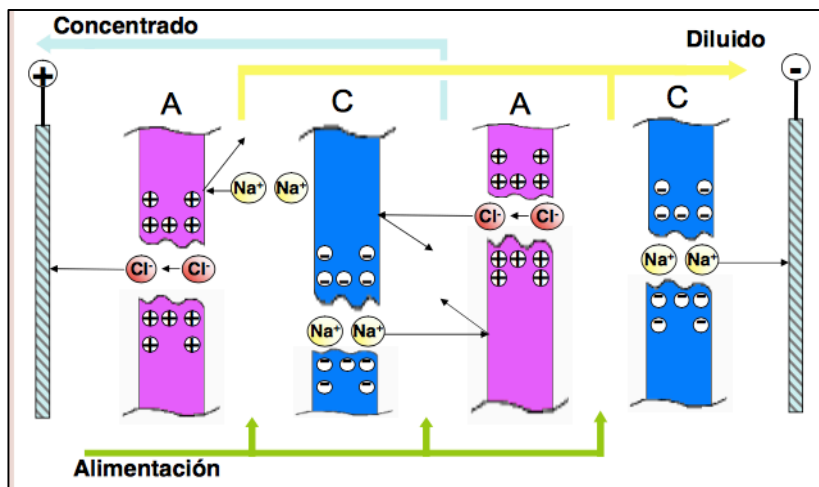


Fuente: MEDINA COLLANA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. [En línea] < http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1066/1/medina_cj.pdf >

1.7.4 Proceso de transporte a través de las membranas. El movimiento de los cationes y de los aniones es debido a una diferencia de potencial que se aplica a ambos electrodos. En un equipo de electrodesionización, los cationes migran a través de las membranas de intercambio de cationes, y son retenidos por las membranas de intercambio de aniones, como se muestra en la **Ilustración 14**. De otro lado, los aniones migran a través de las membranas de intercambio de aniones, y son retenidos por las membranas de intercambio de intercambio de cationes. Este movimiento produce una elevación en la concentración de iones en la cámara de concentrado y la disminución en la cámara adyacente, la cámara de dilución o permeado.⁴¹

⁴¹ MEDINA COLLANA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería química y textil. Tesis para optar por el grado académico de maestro en Ingeniería de procesos. Lima-Perú. 2009. p 63. [En línea] < http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1066/1/medina_cj.pdf >

Ilustración 14. Diagrama de mecanismo de las membranas



Fuente: MEDINA COLLANA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. [En línea] < http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1066/1/medina_cj.pdf >

1.8 REÚSO DE AGUA PARA AGRICULTURA

Según la FAO, la agricultura y especialmente la agricultura de regadío, es con mucho el sector con mayor extracción y uso consecutivo de agua⁴², se estima que a nivel Nacional se utiliza el 61% y 53% de agua residual para fines agrícolas. La agricultura se puede ver altamente beneficiada en la reutilización de aguas residuales ya que habría más disponibilidad del recurso para el sector de forma continua sin afectar la producción y habría un aprovechamiento de los posibles nutrientes que contengan estos efluentes.

El problema más abundante para la reutilización del agua proveniente de procesos industriales radica en las propiedades fisicoquímicas relacionadas con infiltración de agua en el suelo, toxicidad de iones presentes en ella, salinidad, sólidos en suspensión, metales pesados, entre otros. Dado esto se da la limitación del uso debido a su afectación en el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos, que hace necesario adoptar técnicas de mejoramiento de estos factores.

⁴² Tomado de FAO.2016. Sitio web AQUASTAT. 2016. Organizaciones de las Naciones Unidas

1.9 MARCO LEGAL

El siguiente trabajo está encaminado al reuso de las aguas mineras para un fin agrícola, donde se parte con los parámetros característicos de tales vertimientos, en conjunto con un cumplimiento a los artículos establecidos por el Gobierno Nacional, con la finalidad de una minería orientada a la parte socio ambiental en el estado colombiano:

- **Resolución 0631 del 17 marzo del 2015**, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. En el **ANEXO B** se pueden encontrar el *Artículo 10* de esta resolución, el cual indica los parámetros fisicoquímicos de vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales de actividades mineras (extracción de carbón de piedra y lignito), el cual permite identificar la caracterización del agua vertida por parte de la empresa Mina 2 LTDA a cuerpos de agua actualmente.
- **La resolución 1207 del 18 de mayo del 2014**, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, por el cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. En el **ANEXO C** se pueden encontrar el *Artículo 6*, el cual dispone los parámetros esenciales del agua para su utilización en la agricultura. Esta resolución permite identificar la alta conductividad del agua de la empresa Mina 2 LTDA. para su uso agrícola, por lo que se hace objeto de estudio de este trabajo con la finalidad de presentar la mejor propuesta para la disminución de este parámetro.

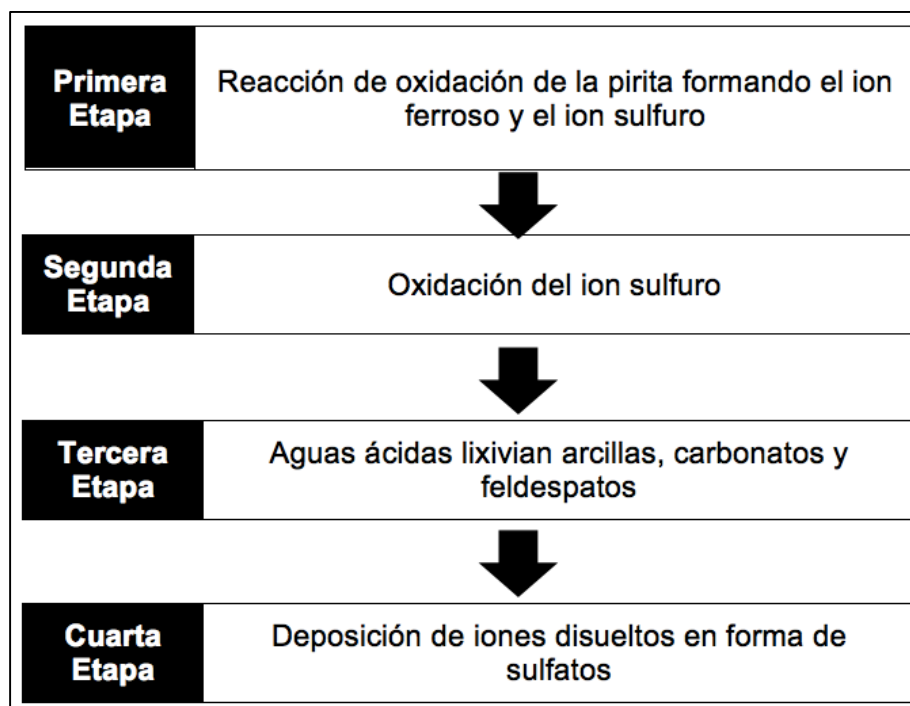
2. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MINA 2 LTDA, SAN MATEO, BOYACÁ

2.1 GENERACIÓN Y FLUJOS DE AGUAS RESIDUALES

En la industria minera los principales desechos son las aguas ácidas que se bombean de las minas a causa de la explotación de la tierra. Estas aguas que se bombean de las minas de carbón son muy ácidas y muy concentradas en hierro, además se produce ácido sulfúrico por la oxidación de los minerales sulfurados contenidos en el carbón y las rocas adyacentes⁴³.

Los DAM son producto de la oxidación química y biológica de la pirita, la cual es la fase mineral más abundante del lignito junto con el cuarzo, caolinita e illita, que reaccionan con otros elementos importantes para la formación de este tipo de agua minera. El mecanismo de oxidación y degradación en la calidad del agua procedente de actividades mineras está evidenciado en la **Ilustración 15**:

Ilustración 15. Generación de DAM



Fuente: Baker y Banfield. Pasos o etapas de formación de DAM. (2013)

⁴³ DEPARTAMENTO DE SANIDAD Y MEDIO AMBIENTE. Manual de tratamiento de aguas negras. México, Limusa, 2000.

Cada una de estas etapas tiene como elemento catalizador las bacterias y la velocidad de reacción depende de numerosos factores como temperatura, cantidad de sulfuros, granulometría, presencia de agua, aire y bacterias⁴⁴.

Una vez ha finalizado la cuarta etapa se obtienen los conocidos DAM, presentando altas concentraciones de cationes alcalinos y aniones en disolución, sulfatos y metales tóxicos⁴⁵ generando bajos contenidos de pH entre 2 a 6. La caracterización hidrogeoquímica de los drenajes de mina, incluye la acidez protónica debida a los hidrógenos libres (H^+) más la acidez mineral debido a la disolución de Fe, Al, Mn y otros⁴⁶, que intervienen en la alta conductividad de este tipo de aguas, que originan graves consecuencias en acuíferos subterráneos y sistemas fluviales que tienen acceso directo a seres vivos representando la principal causa de contaminación por actividades mineras, por lo que es importante un tratamiento previo a su vertimiento.

Los DAM se transportan por canales dentro del socavón hacia tanques de relaves ubicados en el interior de la mina en donde el agua es acumulada y son conducidos posteriormente a través de una red de tuberías tan pronto alcance su capacidad máxima a tanques de sedimentación fuera de la bocamina, que por acción de la gravedad permite separar las partículas suspendidas y facilitar su manejo y posterior tratamiento convencional.

En la mina 2 LTDA, los flujos de agua residual son muy variables debido a que está en función de la operación de limpieza, pero aproximadamente se ha establecido un flujo de agua de $40m^3$ de agua residual tratada por mes. Este caudal tiene que ver también con la capacidad de almacenamiento que existe en los tanques de relaves al interior de la mina.

2.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

El tratamiento de aguas residuales consiste en realizar procesos físicos, químicos o biológicos para poder eliminar los contaminantes de las aguas residuales, con el fin de minimizar el impacto ecológico por su disposición al medio ambiente, cumpliendo con leyes establecidas en el país o su reutilización en otras operaciones industriales.

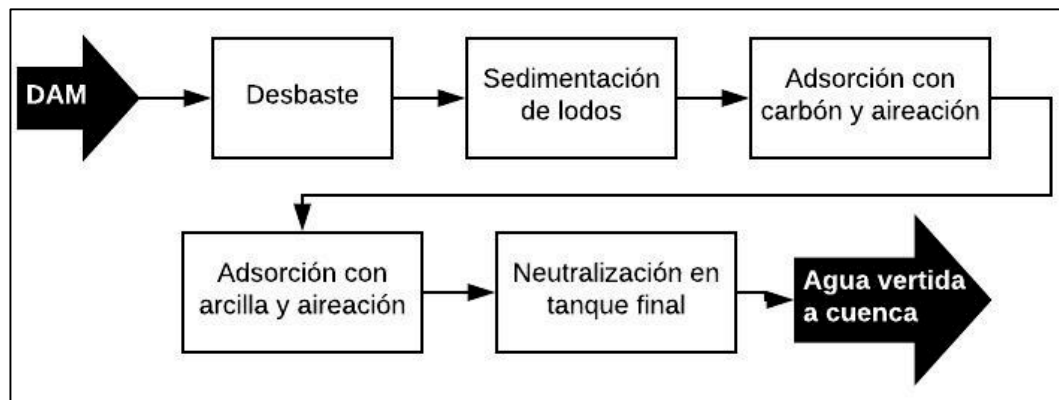
Al producirse un caudal continuo de $1.5m^3$ de agua vertida por día, la sociedad Mina 2 LTDA, se ve en apuros al presentar un denominado drenaje ácido de minas

⁴⁴ LOZA, Nereyda., ADUVIRE, Osvaldo. Optimización de un proceso de tratamiento de aguas ácidas de mina para reducir contenidos de manganeso mediante neutralización secuencial. En: Tecnologías y ciencias del agua. vol. 8, no. 3 Jutepec, May./Jun. 2017. 3 p.

⁴⁵ PUENTE, Ivan., POZO, José., LAGÜELA, Susana., VEIGA, María. Tratamiento microbiano de aguas ácidas resultantes de la actividad minera: una revisión. Instituto Mexicano de tecnología del agua, 2017.

(DAM), debido a que las condiciones en las que se presenta este afluente no son óptimas ya sea, en un uso o vertimiento puntual de estas aguas. Uno de los problemas graves, es la presencia de un pH inferior a 4 en sus características fisicoquímicas denotadas en los **ANEXO D y E**, donde aún no se presentaban pretratamientos frente a su disposición final. Dado a este acontecimiento, la empresa emprendió un estudio en tratamientos de aguas residuales donde abarcaron teórica y experimentalmente, la construcción de una planta de procesos de neutralización convencional. Tal proceso cuenta con 5 etapas, las cuales llevan por nombre: etapa de desbaste, neutralización, aireación, sedimentación y disposición de lodos. Adicionalmente, este proceso convencional, presenta modificaciones debido a que componentes como el carbón coque y la arcilla, entran a ser parte de este tratamiento por sus características como adsorbentes de metales pesados, hierro y manganeso que al no depurar pueden llegar a afectar el objetivo final de este proyecto, que es disponer de esta agua, en temas agrícolas⁴⁷.

Ilustración 16. Tratamiento convencional de Mina 2 LTDA



Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Desbaste. A diferencia del proceso frecuentado en muchas plantas de tratamiento de agua, el proceso de desbaste de la empresa de estudio se diferencia en el uso de ladrillos secuenciales y no de rejillas (*Ilustración 17*), dentro de un canal de tránsito de agua ubicados de manera estratégica que cumpla la función principal de este proceso que es la depuración y control del paso de material grueso, arenas y grasas naturales⁴⁸, de aguas provenientes de la extracción de carbón en minas subterráneas.

Una de las importancias en este proceso, además de la mejora en la calidad del agua tratada, es que brinda seguridad en el tratamiento alterno o tratamientos

⁴⁷ ESPINOSA RODRIGUEZ, Miguel Ángel. Diseño de una planta de tratamiento para el drenaje ácido de una mina en el estado de México. Tesis de maestría en ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería de Civil. 1997. 88 p.

⁴⁸ HUERTAS R., MARCOS C., IBARGUREN N., ORDAS S., Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Capítulo 5: 34p

primarios, ya que protege de posibles llegadas de objetos que provoquen obstrucción bien sea en instrumentación (tuberías y válvulas) en los mismos tanques de neutralización y lodos que prosiguen en el tratamiento. Este sistema de desbaste, igual que todos los procesos de mejoramiento de la calidad del agua, necesita de una limpieza y eliminación de material extraído por lo que su manipulación y lavado dentro de la empresa parte semanalmente, para prevenir acumulaciones entre secciones de ladrillos que provoque rebosamiento y posibles alteraciones (microbianas, físicas y químicas) en la calidad del afluente.

Ilustración 17. Sistema de desbaste



Fuente: elaboración propia con base en. Instalaciones de Mina 2 LTDA

2.2.2 Tanques de sedimentación de lodos primarios y neutralización. El proceso de neutralización cumple con los objetivos de alcanzar la remoción tanto de sólidos suspendidos, sólidos disueltos (metales contaminantes y otros), constituyentes orgánicos y por supuesto la neutralización de las aguas provenientes de la producción minera (carbón) con característica de pH ácidos (Efluente entre 2 y 6). Para el caso de Mina 2 Ltd., se presenta “la cal” como agente neutralizante con la finalidad de la creación de lodos o sólidos insolubles correspondientes a hidróxidos de Hierro (Fe), Aluminio (Al), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), entre otros, característicos del agua de esta naturaleza, causando que el pH del efluente incremente. Se resalta un comportamiento en el proceso de neutralización donde el consumo de cal depende completamente del pH óptimo (Entre 7 y 8 según ANEXO B) al que se espera en el tratamiento.

En los tanques de precipitación de lodos (**Ilustración 18**), los metales pesados precipitan en forma de hidróxidos (OH^-)⁴⁹ mediante la adición de cal ocasionando que se incremente el pH del ARM hasta un valor de 8 (básico). Según las características del agua, algunos metales necesitan mayor agregado de cal, para su precipitación, debido a que pueden formar complejos con varios metales pesados que limitan su remoción por este mecanismo, generando un aumento en costos de operación del proceso, por los altos precios de este neutralizador.

Ilustración 18. Tanque de sedimentación de lodos



Fuente: elaboración propia con base en. Instalaciones de Mina 2 LTDA

⁴⁹ TALAVERANO CARDENAS, Luis Felipe. Optimización del desempeño del pH en la precipitación de metales para incrementar la eficiencia del tratamiento de aguas ácidas con producción más limpia en la planta de procesos AWTP pampa larga. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, Perú. Facultad de Ingeniería Química y Textil. 2014. 21 p.

2.2.3 Adsorción con carbón y aireación. La utilización de carbón en sistemas de adsorción es uno de los procesos de tratamiento más comunes para aumentar la calidad de las aguas residuales, esto consiste en introducir el agua a tratar por la parte superior a un sistema que contiene una columna de carbón lignito de diámetro de partícula irregular (capa de $0,45\text{m}^3$) propio de la extracción de la mina que mediante la acción de la gravedad circula hacia abajo y se recupera a través de un sistema de drenaje inferior, durante ese filtrado se captan sustancias solubles del agua sobre la superficie del carbón, retirando entonces componentes orgánicos solubles generadores de malos olores, colores y sabor de aguas subterráneas, y compuestos inorgánicos como nitrógeno, sulfuros y metales pesados remanentes en las aguas residuales tras los tratamientos que le anteceden a la adsorción. Para la limpieza del lecho de carbón lignito se utiliza un sistema simple pero no completamente eficaz en donde se realiza lavado con agua mediante el cual se arrastran partículas, sin embargo, en cierto tiempo el material sólido adsorbente debe ser sustituido.

Ilustración 19. Tanque de adsorción con carbón



Fuente: elaboración propia con base len. Instalaciones de Mina 2 LTDA

2.2.4 Adsorción con arcillas. En la adsorción con arcillas entra a realizar un papel fundamental, debido a que la arcilla (capa de $0,45\text{m}^3$), que gracias a sus propiedades como adsorbente, dada por su elevada área superficial y otras capacidades como lo es, una buena estabilidad química y mecánica aunado a su alta capacidad de intercambio iónico por nombrar algunas, la hacen efectiva en este tipo de drenajes mineros. Y es así su funcionamiento, toma cationes y aniones gracias a sus propiedades ya mencionadas, finalizando una adsorción de metales pesados deseado. Ese intercambio iónico se da en presencia de cationes y aniones que se encuentran en el área superficial de su estructura⁵⁰, como lo son iones Calcio (Ca^{+2}), Magnesio (Mg^{+2}), Hidrógeno (H^+), Potasio (K^+), Amonio (NH_4^+), Sodio (Na^+) y Sulfato (SO_4^{-2}), Cromo (Cr), Fosfato (PO_4^{-3}), Nitratos (NO_3^-) que facilitan aún más las mejoras en la calidad del agua.

Adicionalmente a la adsorción de esos iones previstos en la sección anterior, este componente presenta atracción por las grasas y aceites característicos de los DAM generados por las actividades de mantenimiento provenientes de la maquinaria utilizada, esta atracción de las arcillas a las grasas y aceites favorecen el desarrollo de un agua acondicionada que no va a afectar la actividad fotosintética de las plantas al contacto con esta fuente hídrica, igualmente la oxigenación de los cuerpos de agua donde es vertida luego del tratamiento dispuesto por la mina, ya que con la eliminación de este contaminante, no se presentarán películas obstructoras que impidan el intercambio aire-agua para la producción de oxígeno vital en las cuencas hídricas.⁵¹

El diseño estructurado por la empresa de la planta de tratamiento de agua residuales mineras, no solo emplea elementos como la cal, arcilla y carbón coque para la modificación de las propiedades físico-químicas del agua, sino también utiliza un sistema de dispersión de agua en los diferentes procesos (**Ilustración 19 e Ilustración 20**), enmarcando la presencia de un nuevo proceso de depuración de contaminantes del afluente denominado aireación, donde su finalidad se da en la remoción de gases como el metano (gas presente en la actividad minera de carbón), sulfuro de hidrógeno y demás compuestos orgánicos volátiles⁵² naturales de este tipo de DAM, interfiriendo así en propiedades organolépticas como el olor. Igualmente, al tener un contacto más íntimo con el aire, este conlleva a un aumento

⁵⁰RODRÍGUEZ V., TORRES A. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante arcillas naturales y modificadas. Monografía para optar el título profesional de: Especialista en Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Facultad de Ingeniería Físico-Química y Escuela de Ingeniería Química. 2009. 13, 29, 56 p.

⁵¹JIMÉNEZ MORALES, Soledad. Estudio teórico para el control de la contaminación por grasas y aceites generada por la actividad industrial, doméstica y de servicios. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico Industrial. Instituto Politécnico Nacional de Ciudad de México, México. Facultad de Ingeniería. 2012. 4-11 p.

⁵²HERRERA PEDREROS, Tatiana. Evaluación de los aireadores en la planta de tratamiento de agua potable "el cambio" que abastece a la ciudad de Machala, provincia de El Oro. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Civil. Unidad Académica de Ingeniería Civil de Machala, Ecuador. 2015. 20 p.

del contenido de oxígeno presente en el agua que es de gran importancia frente a su disposición final

Ilustración 20. Tanque de adsorción con arcilla



Fuente: elaboración propia con base en. Instalaciones de Mina 2 LTDA

2.2.5 Tanque final en planta de tratamiento. La última fase del tratamiento dispuesto por la mina implementa un tanque neutralizador donde es agregado cal viva en concentraciones 60 a 70 g de este componente por cada litro de agua tratada. El diseño de este tanque parte mediante un tubo de ingreso tipo flauta, con el que se tiene una dispersión del agua más eficiente a la hora de la mezcla con el neutralizador. Este sistema permite que no se presente ningún tipo de agitación en el tanque, ya que por efectos de burbujeo se tiene una alta distribución del agua en solución con la cal. Al igual que en el primer tanque de sedimentación de lodos, se mejoran las condiciones del agua frente a su pH, dando así por terminado el tratamiento de agua residual de la mina, que es llevada a ser vertida a un acuífero cercano acobijados por la ley en vertimientos puntuales.

Ilustración 21. Tanque final controlador de pH



Fuente: elaboración propia con base en. Instalaciones de Mina 2 LTDA

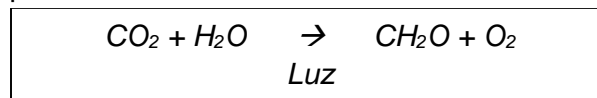
2.3 DIAGNÓSTICO DEL AGUA VERTIDA POR LA MINA PARA FINES AGRÍCOLAS

Dada la disposición y fundamento de este proyecto enfocado en la fiabilidad de irrigación con agua proveniente de la mina de carbón previamente tratada bajo efecto de sistemas de pretratamientos y tratamientos secuenciales, se presenta la importancia frente a la calidad del agua que esta presenta en sus vertederos puntuales. Es por ello, que el objetivo principal se enfoca en alternativas en tratamiento que faciliten su utilización, partiendo del análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados fisicoquímicos aportados por las directrices de la empresa junto con la importancia hacia su disposición y posibles efectos al ser reusada como agua de riego.

Ya enfocado hacia la calidad del agua, no es justificable persuadir la importancia o conocimiento hacia las afectaciones que se pueden efectuar en el suelo de la comunidad “San matense” por un manejo inadecuado de los vertederos de la mina, debido a que, el suelo al exteriorizar características medibles interviene directamente hacia el crecimiento de las plantas y cultivos a los que se quiera privilegiar de este sistema de riego en disposición de la empresa. Es claro que, al no ostentar una calidad óptima del agua, se presentarían regados en condiciones

adversas, interviniendo directamente en la siguiente reacción fotosintética⁵³ de las plantas:

Reacción 5. Reacción fotosintética de las plantas



Fuente: manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. 3 ed. KEMMER, Frank N. y MCCALLION, John. Nalco Chemical Company. Usos del Agua en la agricultura.

La **Reacción 1** se presenta bajo condiciones solares (luz del sol) y clorofila como catalizador. Los efectos incidentes van ligados a acumulaciones de sales y metales pesados como Plomo (Pb^{+2}), Arsénico (As^{+3}) y Cadmio (Cd^{+2}) en tallos, hojas y raíces que no facilitan la incidencia en frutos ni en su desarrollo natural de crecimiento. Consecuentemente con lo mencionado, se presentó un desarrollo informativo y analítico de las condiciones en las que se encuentra el agua y sus posibles consecuencias al darle un uso:

2.3.1 Características físicas y químicas del agua residual. Las características físicas-químicas del agua residual de la mina fueron evaluadas en *Analizar Laboratorio Fisicoquímico LTDA* situada en la ciudad de Duitama (Boy) (aproximadamente a 4 horas y media de Mina 2 LTDA), *dadas* dos muestras en recipientes previamente estandarizados de 1.5 L cada uno, a condiciones naturales de presión y temperatura en el municipio de San Mateo (Boy), cuyos resultados se encuentran descritos en la parte final del documento (*ANEXO G*).

2.3.1.1 Toma de muestra. Dada la actividad minera diaria de la empresa Mina 2 LTDA, se presentan dos jornadas de trabajo (mañana y tarde) donde se difiere en la cantidad de toneladas de carbón dispuestas por los trabajadores. Es por ello que para la toma de las muestras se realizó dos intervenciones de muestreo del AR ligada al último tanque de tratamiento (tanque neutralizador), cada una en un recipiente de 1.5 L dada la finalización de cada jornada laboral. Con ello se facilita una aceptación en los resultados ya que el flujo de agua bombeada directamente de los tanques de relaves dentro del socavón difiere de la acumulación de AR presente en estos, llegando a presenciar, un aumento en los contaminantes que interfieren en la apreciación correcta de las características FQ de este DAM.

⁵³ KEMMER, Frank N. y MCCALLION, John. Nalco Chemical Company. Usos del Agua en la agricultura. En: Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. 3 ed. México: Mc Graw Hill 1989. P. 42-5

Los resultados utilizados para el respectivo análisis fueron los que presentaban datos mayores respecto al otro, dando origen al informe expedido por la empresa contratada presentado en los **ANEXOS D, E, F Y G**.

2.3.1.2 Análisis de resultados frente al Marco Legal de vertimientos y agricultura. En la Tabla 10 se observa que, en el año 2011, año en el que no se disponía del tratamiento convencional hablado anteriormente, el agua residual de Mina 2 LTDA contenía un alto porcentaje de sólidos suspendidos totales, concentración elevada de hierro y sulfatos, que la caracterizaban como un agua fuertemente ácida con pH inferiores a 6 y altamente conductiva por el contenido de sales en forma de sulfatos, ocasionando grandes problemas en el manejo de estos DAM que contaminaban los cuerpos de agua donde era vertida, debido a que no se cumplía con ninguno de los parámetros de vertimiento.

Tabla 3 : Resultados fisicoquímicos del año 2011 del ARM

Parámetro	Año 2011 (Agua Cruda)	Parámetros de vertimiento de la resolución 0631
pH	3,01	6,0 – 9,0
SST (mgSST/L)	61	50
Hierro Total (mgFe/L)	46,5	2
Conductividad (µS/cm)	3560	NA
Sulfatos (mg SO ₄ ⁻² /L)	1970	1200

Fuente: elaboración propia

En el año 2014 (**Tabla 11**) implementando el tratamiento convencional descrito, se observa que los niveles de sólidos suspendidos totales y la concentración de hierro descendieron en más del 80% respecto al agua cruda obtenida de las actividades de Mina 2 LTDA, también se observa que hay una mejora en el pH del agua residual, ya que se realiza una neutralización, incrementando su pH, cumpliendo así con todos los parámetros de vertimiento a cuerpos de agua superficiales de la resolución 0631 del 17 de marzo del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Sin embargo, se observa que la conductividad y la cantidad de sulfatos no tiene cambios tan notables como las otras propiedades.

Tabla 4. Resultados fisicoquímicos del año 2014 del ARM

Parámetro	Año 2014 (Agua tratada)	% Remoción	Parámetros de vertimiento de la resolución 0631
pH	8,27	pH básico	6,0 – 9,0
SST (mgSST/L)	< 9	85,25 %	50
Hierro Total (mgFe/L)	0,72	98,45 %	2
Conductividad (µS/cm)	3080	13,48 %	NA
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L)	836	57,56 %	1200

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Resultados fisicoquímicos del año 2019 del ARM

Parámetro	Año 2019 (Agua tratada)	Parámetros de vertimiento de la resolución 0631	Parámetros para uso agrícola según resolución 1207	Cumplimiento para uso agrícola
pH	8,04	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0	CUMPLE
SST (mgSST/L)	15	50	NA	CUMPLE
Hierro Total (mgFe/L)	0,11	2	5	CUMPLE
Conductividad (µS/cm)	4350	NA	1500	NO CUMPLE
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L)	2554	1200	500	NO CUMPLE

Fuente: elaboración propia

Según los últimos resultados realizados en el año 2019 se demuestra que por la cantidad de sulfatos contenidos en el agua residual no es permitido reutilizarla en la agricultura sin un previo tratamiento que reduzca en un alto porcentaje la concentración de estos iones, y a su vez baje los niveles de conductividad, ya que hay una relación directa entre el contenido de sulfatos en el agua y esta propiedad física del agua, demostrada en la **Tabla 6**:

Tabla 6: Relación sulfatos y conductividad⁵⁴

Concentración Sulfato (mg/L)	Conductividad Eléctrica (µS/cm)
500 – 800	770 - 1200
800 – 1000	1200 - 1500
1000 – 1500	1500 - 2300
1500 – 2000	2300 - 3100
2000 – 2500	3100 - 4000

Fuente: SANCHEZ F, Ana María. Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego. División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Chile Departamento de ingeniería Civil, 2005. Anexo A

Se tiene entonces que el agua residual de Mina 2 LTDA está en el intervalo de los contenidos más críticos de sulfatos de 2000 a 2500 mg/L y una conductividad eléctrica alta (**Tabla 13**), y es necesario entonces disminuir la concentración de sulfatos hasta 500 mg/L que nos conllevaría a una conductividad entre 770 a 1200 µS/cm (dado que los sulfatos son los aniones de mayor cantidad en el agua y a la vez componentes principales de las sales soluble presentes en esta, impactaran proporcionalmente en la salinidad de este tipo de agua)⁵⁵, en donde se estaría cumpliendo con los niveles permisibles de estos dos parámetros para uso en la agricultura.

2.3.1.3 Efecto de las sales sobre las especies agrícolas. La conductividad eléctrica es el parámetro más extendido y utilizado en la estimación de la salinidad y por tanto esta propiedad refleja la concentración de sales solubles en el agua residual⁵⁶. En los resultados obtenidos este parámetro es uno de los limitantes para la reutilización del agua en la agricultura, debido al aumento de iones Sulfato (SO₄²⁻), Sodio (Na⁺) y Cloro (Cl⁻) hasta un nivel en que afectaría el crecimiento, producción y rendimiento de un alto número de especies agrícolas importantes del sector económico.

Para que las plantas logren absorber agua fácilmente de los suelos es necesario que sus raíces tengan potenciales hídricos inferiores a los solutos presentes en el agua. Al incrementar la cantidad de solutos salinos en el agua, su potencial hídrico

⁵⁴ SANCHEZ F, Ana María. Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego. División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Chile Departamento de ingeniería Civil, 2005. Anexo A

⁵⁵ Ibid., p 157.

⁵⁶ MIRANDA D., CARRANZA C., FISHER G. Calidad del agua de riego en la sabana de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, 2008. Capítulo 2: 15p.

disminuye y las plantas requieren mucha más energía para la producción intracelular de sustancias solubles que disminuyan aún más el potencial hídrico intracelular de ellas y por lo tanto el agua tendería a salir de sus células, ocasionando una deshidratación celular y posterior muerte debido al desbalance osmótico resultante.

Otros de las afectaciones de las sales en las plantas es su toxicidad iónica. Los iones que más problemas inducen son el sodio (Na^+) y cloruros (Cl^-), aunque otros como el nitrato (NO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}) y amonio (NH_4^+) también pueden ser tóxicos. La acumulación de estos iones en las hojas y órganos de plantas reduce la tasa fotosintética, induce la pérdida de pigmentos y provoca la senescencia⁵⁷. Por ejemplo, el ion sodio desplaza el calcio de las membranas celulares, modificando la absorción de algunos nutrientes como es el potasio, que es esencial en el crecimiento y reproducción de las plantas, además al no absorber este nutriente, las plantas reducen el ingreso de CO_2 debido al cierre de las estomas inhibiendo entonces la fotosíntesis. En general, se disminuye la producción de biomasa en raíces, hojas, tallos y semillas, el área foliar y la longitud de plantas⁵⁸.

2.3.1.4 Efecto de metales pesados en las plantas. El sector minero es una de las principales industrias que son fuente de contaminación de aguas a causa de presencia de metales pesados en sus aguas residuales, que son altamente dañinos para seres vivos, como la plantas. Algunos de los potenciales daños producidos por las altas concentraciones de metales pesados en la planta se tienen: la necrosis en las puntas de las hojas, la inhibición del crecimiento de las raíces y en el peor de los casos la muerte total de la planta⁵⁹

El exceso de metales pesados en plantas ocasiona reducción en la elasticidad y la extensibilidad de las paredes celulares debido a trastornos enzimáticos en la biosíntesis de macromoléculas de la pared⁶⁰. Los metales pesados intervienen afectando el regular ciclo de Calvin, debido a que inhiben el flujo de electrones, aumentan la resistencia estomática e interfieren en la distribución de elementos esenciales en el metabolismo de las plantas como lo son potasio, calcio y magnesio, en respuesta a la poca tolerabilidad que tienen a algunos metales pesados.

Dando uso a los resultados provenientes del análisis fisicoquímico del agua residual de la mina, se evidencia la presencia del Manganeso (Mn) en concentraciones

⁵⁷ MIRANDA D., CARRANZA C., FISHER G. Calidad del agua de riego en la sabana de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, 2008. Capítulo 2: 12p.

⁵⁸ Ibid., p.13

⁵⁹ TEJADA, Candelaria., VILLABONA, Ángel., GARCÉS, Luz. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. En: Tecnológica, octubre, 2015, vol 8, no. 34.

⁶⁰ GARCÍA, D. Efectos fisiológicos y compartimentación radicular en plantas de *Zea mays* L, expuestas a la toxicidad por plomo. Tesis doctoral en ciencias biológicas. Universidad Autónoma de Barcelona. 131 p.

mayores al límite estipulado por el Gobierno Nacional (**ANEXO C**) para su disposición en reuso agrícola. Habiendo la presencia de este metal, su limitación hacia las plantas o cultivos a donde se dispondrá el agua, se basa en la toxicidad que presentarán en estas mismas, dada a la aparición de posible clorosis marginal (se caracteriza por el amarilleo o el escaldado de las márgenes de las hojas) y Necrosis (muerte de Células)⁶¹ de hojas junto con disminución en la capacidad de respiración de la planta digno de la afectación que este trae en las enzimas encargadas de esta vitalidad. Es evidente que la cantidad presente en el agua no es tan elevada frente otros (sales) parámetros descritos en los resultados, pero se hace necesario su depuración para generar un mejor resultado en la calidad de este afluente.

⁶¹ POSADA, Fánor., POVEDA, Jeimy. La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*fragaria* sp. cv. Camarosa), 2005. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v23n2/v23n2a13.pdf>

3. DESCRIPCIÓN Y VALORACIÓN DE LA ALTERNATIVA PARA LA REUTILIZACIÓN CON FINES AGRÍCOLAS

El análisis observado en el capítulo I realizado con la muestra del agua residual en Mina 2 Ltda. antes de su vertimiento, concluyó que está formada por minerales disueltos y cantidades apreciables de sales metálicas que se disuelven en el agua separándose en iones, los cuales son difíciles de ser removidos por los tratamientos realizados actualmente en la mina en su totalidad y que son indeseables para su reúso en la agricultura.

3.1 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Existe una variedad de tratamientos para aguas residuales que se dividen según el diseño de las unidades que lo conforman y el objetivo que persiguen, se pueden clasificar como pretratamientos, tratamientos primarios, tratamientos secundarios y tratamientos terciarios según la literatura evidenciada en el marco teórico del presente proyecto.

El tratamiento convencional aplicado en las aguas residuales de Mina 2 LTDA cuenta con procesos de pretratamiento y tratamiento primario y secundario en toda su extensión, sin embargo para la remoción de iones sulfato que son causa importante de la elevada conductividad de este tipo de aguas residuales se hace necesario implementar un nuevo proceso que mejore la calidad del efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su reúso, por lo tanto es necesario aplicar un tratamiento terciario que reduzca cantidades apreciables de iones sulfato y sales metálicas, dentro de los cuales están los siguientes procesos:

- Intercambio iónico
- Osmosis inversa
- Electrodesionización

Para la selección del tratamiento del agua residual de Mina 2 LTDA se utilizó una herramienta cuantitativa y cualitativa que permite comparar las opciones de tratamiento terciario entre sí, denominada, *Método Pugh*, esta herramienta hace uso de una matriz de decisión que evalúa un conjunto de criterios según las necesidades y satisfacción de la empresa, tomando como referencia el diseño actual. Para cada una de las alternativas, se analiza uno por uno de los criterios y se caracterizan por su nivel de cumplimiento respecto al estado actual de Mina 2 LTDA, con signo negativo (-1) si el cumplimiento del criterio no satisface y con signo positivo (+1) si hay cumplimiento. (**Tabla 14**).

Los criterios que se utilizan para la selección de la alternativa no poseen el mismo impacto sobre la empresa y el presente proyecto, por lo cual, se establecieron unos

porcentajes (%) de importancia para ponderar según el nivel crítico de cada uno de los ítems a evaluar y analizar, que servirá para que el impacto de cada comparación no tenga la misma influencia sobre la selección. Entre los criterios a evaluar para la selección de la alternativa, se tuvieron en cuenta los siguientes:

- **Factibilidad:** este criterio se refiere a la compatibilidad que tiene el proceso según las condiciones actuales de la mina, en cuanto a capacidad de inversión, disponibilidad de recursos y terreno.
- **Aplicabilidad (Reducción de iones sulfato y conductividad):** se evalúa a través de este ítem la capacidad del proceso de proveer los requerimientos del proyecto y la calidad requerida para el manejo de los caudales de la Mina, se apoya en experiencias previas con datos publicados de estudios a escala piloto.
- **Confiabilidad:** se evalúa a partir de este criterio la capacidad del proceso de cumplir con los objetivos del proyecto sistema en cuanto a la mejora de la calidad del efluente según los estándares de reuso en la agricultura con la mínima dependencia de tecnología, ya que incurriría en gastos mayores para la empresa, debido a que actualmente ellos no cuentan con una planta de tratamiento abastecida de equipos tecnológicos, sino más bien un diseño artesanal.
- **Características del efluente:** el origen, la composición y el caudal del agua residual es un factor importante en la selección del tratamiento debido a que afectan directamente los parámetros y requisitos operacionales del proceso, el cual debe trabajar con las condiciones iniciales del agua residual sin tener problemas operacionales. Este ítem evalúa la necesidad de pretratamientos (físicos, químicos o biológicos) para la buena operación del sistema.
- **Deposición de residuos:** es necesario evaluar la cantidad y calidad de los residuos que genera la utilización del proceso que se quiera implementar para no incurrir en gastos constantes de tratamiento para la disposición de estos residuos.
- **Costos de construcción y operación:** es de importancia este ítem debido a que se debe tener en cuenta la capacidad de costear la inversión en la adición de un proceso en el tratamiento actual de la Mina inversión (Diseño, Construcción, Mano de Obra, terreno), y además en los costos de operación y mantenimiento que este conlleva (Insumos, Requerimientos de energía, personal), con el fin de que el proceso que se seleccione para Mina 2 se encuentre dentro del rango disponible por la empresa e incluso proponer un proceso que minimice las inversiones y cumpla con los requerimientos.

- **Requerimientos de personal:** este ítem evalúa la complejidad del proceso, debido a que los sistemas más sencillos son los que requieren menos personal para su construcción y menor capacitación de adiestramiento profesional para su operación.

Tabla 7: Matriz de Pugh

		TRATAMIENTOS TERCARIOS				
		%	Referencia	Osmosis Inversa	Intercambio iónico	Electrodesionización
CRITERIOS	Factibilidad	25 %	Proceso Convencional	-1	+1	-1
	Aplicabilidad	25 %	Proceso Convencional	+1	+1	+1
	Confiabilidad	10 %	Proceso Convencional	-1	+1	-1
	Características del efluente	8 %	Proceso Convencional	-1	+1	-1
	Deposición de residuos	6 %	Proceso Convencional	-1	-1	+1
	Costos	21 %	Proceso Convencional	-1	-1	-1
	Requerimientos de personal	5 %	Proceso Convencional	-1	+1	-1

Fuente: elaboración propia

Aplicando el porcentaje de importancia a cada uno de los criterios, se obtiene la tabla ponderada, para la selección de la alternativa (**Tabla 15**).

Tabla 8. Matriz ponderada de Pugh

		TRATAMIENTOS TERCARIOS			
		%	Osmosis Inversa	Intercambio iónico	Electrodesionización
CRITERIOS	Factibilidad	25 %	-25	25	-25
	Aplicabilidad	25 %	25	25	25
	Confiabilidad	10 %	-10	10	-10

Fuente: elaboración propia

Tabla 9. (Continuación)

	%	Osmosis Inversa	Intercambio iónico	Electrodesionización
Características del efluente	8 %	-8	8	-8
Deposición de residuos	6 %	-6	-6	6
Costos	21 %	-21	-21	-21
Requerimientos de personal	5 %	-5	5	-5
TOTAL		-50	46	-38
Ranking		III	I	II

Fuente: elaboración propia

A partir del método utilizado se puede observar que el sistema de intercambio iónico con resinas es el que más se adapta a las condiciones actuales de Mina 2 LTDA, se puede observar que los tres procesos planteados cumplen con los objetivos de disminución de sales y metales (Aplicabilidad), sin embargo, la mejor opción para la realización del proyecto es el uso de resinas de intercambio iónico, cumpliendo con la mayoría de los criterios establecidos en la matriz de selección, a diferencia de los procesos de Osmosis Inversa y Electrodesionización, los cuales según la literatura son procesos utilizados cuando se requiere de una alta purificación del agua (consumo humano).

Para la utilización de procesos como Osmosis Inversa y Electrodesionización se necesitarían de tratamientos previos del agua residual de Mina 2 LTDA porque sus características fisicoquímicas, por ejemplo, la dureza, limitarían su operación y es necesario entonces controlar la calidad del agua que ingresa a estos sistemas, influyendo en un aumento en los costos de operación, a diferencia de un proceso con resinas de intercambio iónico, en donde el agua residual con la que se trabajará no afectará ni limitará las condiciones de operación del proceso, disminuyendo sus costos operativos y de mantenimiento.

Además del aumento de los costos operativos en la utilización de estos dos procesos (Osmosis Inversa y Electrodesionización) debido a que es necesario ejercer altas presiones durante el proceso y el consumo de energía también es elevado, los costos de inversión en diseño, construcción y mano de obra también incrementan, porque su instalación es bastante compleja y necesita de ayuda profesional por su dependencia tecnológica. Por otro lado, las resinas son económicas, muy versátiles y son de fácil adaptación a situaciones específicas, sumado a que son de fácil operación ya que no se necesita de un control estricto durante su operación.

Además de la comparación a partir de los criterios establecidos anteriormente entre los tratamientos terciarios encontrados en la literatura para la reducción de sulfatos y metales pesados en el agua residual, se soporta la selección de la alternativa mediante la siguiente comparación entre otros tratamientos de aguas residuales en la **Tabla 16**:

Tabla 10: Comparación entre tratamientos de aguas residuales

Constituyente	Concentración Inhibidora	Tratamiento Sugerido
Sólidos en suspensión	< 124 mg/L	Lagunas, Sedimentación, Flotación
Aceites y Grasas	> 100 mg/L	Flotación
Metales pesados	1 - 10 mg/L	Precipitación o Intercambio Iónico
Alcalinidad	0,5 Kg como CaCO ₃	Neutralización de la alcalinidad
Acidez	Acidez mineral libre	Neutralización
Sulfuros	> 100 mg/L	Precipitación o desgasificación
Cloruros	8000 - 25000 mg/L	Dilución
Fenoles	70 - 160 mg/L	Desgasificación
Amoniaco	> 1600 mg/L	Dilución, Ajuste pH y Desgasificación
Sales disueltas	> 16000 mg/L	Dilución, Intercambio Iónico

Fuente: RENDÓN, Claudia. Criterios de selección para el tratamiento de las aguas residuales. Relación constituyente, limitante, tratamiento. [En línea] <<https://es.slideshare.net/carodiaz7906/captulo-3-criterios-de-seleccin-para-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales>> [citado el 05 de marzo del 2019]

En donde según la literatura los procesos de intercambio iónico es el proceso sugerido debido a que son los más favorables para el tratamiento de sales disueltas y metales pesados en el agua, el cual es el objetivo del presente proyecto, sin tener preocupación en problemas de operación por concentración de sales o metales que

inhiban el proceso, debido a que no se sobrepasa de los niveles establecidos para su uso.

3.2 ESTUDIO DE LA ALTERNATIVA CON RESINAS INTERCAMBIO IÓNICO

El sistema convencional del tratamiento actual de los DAM observado en el capítulo anterior maneja tratamientos primarios, secundarios y terciarios comunes que permiten que este residuo minero cumpla con las normativas de riego en el país, sin embargo al realizar un completo análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua vertida por la mina y compararlas con los parámetro de riego, se concluyó que no es apta para su uso en la agricultura debido a que en el análisis fisicoquímico realizado y demostrado en el anterior capítulo, el contenido de sulfatos sobrepasaba el valor máximo permitido de concentración de estos iones, que según la resolución 1207 del 2014 no debe sobrepasar los 500 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$, causando además un incremento en otros de los parámetros, la conductividad que sobrepasa el límite permitido de 1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$, por ende se hace necesario incluir un tratamiento terciario que proporcione un aumento en la calidad de efluente para llevarlo a estándares requeridos de riego en Colombia y que sea de fácil implementación teniendo en cuenta las condiciones actuales de Mina 2 LTDA., con el propósito de la reutilización en agricultura y disminución de la contaminación hídrica actualmente realizada por la empresa. Para este fin se ha considerado la posibilidad de implementar un sistema con resinas que resultaría como una etapa final en el tratamiento de la mina, proceso denominado Intercambio Iónico.

Las unidades de intercambio iónico se basan en la transferencia de uno o más iones de la fase líquida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas o grupos funcionales superficiales⁶². En nuestro contexto de purificación de agua, se refiere a que los iones impuros presentes en el agua son reemplazados por iones que desprenden el sólido, es decir, las resinas de intercambio iónico. Las resinas son materiales sintéticos basadas en un copolímero de estireno-divinilbenceno, son sólidos e insolubles en agua que se presentan en forma de esferas de 0,3 a 1,2 mm de tamaño, pero también se pueden encontrar en forma de polvo⁶³.

Los sistemas de intercambio iónico en el tratamiento de aguas residuales son muy versátiles en aquellas que son relativamente bajas en concentración de sales y se desea eliminar su contenido para adecuarlas en otras actividades sin ser operaciones excesivamente costosas. Además, las resinas son muy estables

⁶² MARTINEZ, Joelha. Tratamiento de aguas residuales e intercambio iónico [online]: issuu, Marzo, 2012. [Citado marzo 12, 2019] Disponible en: <https://issuu.com/joelvmartinez/docs/revistavirtual>

⁶³ Ibid., p. 2.

químicamente, de larga duración y fácil regeneración⁶⁴, esto último es debido a que la acción de intercambio iónico corresponde a una reacción reversible.

3.2.1 Disponibilidad de resinas. En la *Tabla 17* se presenta la información de tres empresas las cuales pueden proporcionar resinas aniónicas útiles para el desarrollo de la experimentación y posible implementación del sistema de intercambio iónico.

Cuadro 8. Disponibilidad de resinas

Empresa Distribuidora	Referencia de la resina
Biocidas y Químicos S.A.S	<ul style="list-style-type: none"> • LEWATIT MonoPlus MP 68 • LEWATIT MonoPlus M600 • LEWATIT MonoPlus M800 OH
GSA (Gestión y soluciones Ambientales de Colombia)	<ul style="list-style-type: none"> • AMBERLITE IRA402 Cl • LEWATIT MonoPlus M500
Universal Osmosis S.A.S	<ul style="list-style-type: none"> • LEWATIT Monoplus S800

Fuente: empresas Biocidas y Químicos S.A.S, GSA y Universal Osmosis

3.2.2 Criterios para la selección de resinas de intercambio iónico. Se contarán con seis criterios de selección de la resina, que relacionan características técnicas propias de ellas, factores económicos y requerimientos puntuales de relevancia a evaluar por Mina 2 LTDA, estos criterios servirán para evaluar las resinas disponibles en el mercado y escoger la más favorable que haga cumplir los objetivos del presente proyecto, estos criterios de selección son:

3.2.2.1 Capacidad de intercambio. La capacidad de intercambio corresponde al número de sitios activos donde el intercambio iónico tiene lugar durante un ciclo⁶⁵. Es la propiedad principal de la resina en el diseño de un equipo de intercambio iónico ya que con esta se determina el volumen requerido de resina para tratar un determinado flujo de agua, entonces se debe considerar el flujo de 1,5 m³ diario de agua residual manejado en Mina 2 LTDA.

⁶⁴ RIGOLA LAPEÑA, Miguel. Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales. Barcelona. Marcombo Boixareu Editores. Capítulo III: Separaciones de sólidos y gases disueltos. 73 p.

⁶⁵ DARDEL.François propiedades de las resinas. Capacidad de intercambio total y útil [En línea]< http://dardel.info/IX/resin_properties_ES.html#particle_size > [citado el 10 de marzo del 2019]

3.2.2.2 Agente regenerante. En este criterio se tiene en cuenta si el agente regenerante es comercialmente accesible lo que puede incrementar o disminuir los costos de operación del proceso y además la flexibilidad del químico en donde interviene su uso y factores de seguridad. Para las resinas aniónicas que son de interés en el proyecto, su agente regenerante común es soda cáustica (NaOH), en donde es necesario tener en cuenta los volúmenes de agente regenerante a usar para cada una de las resinas disponibles en el mercado.

3.2.2.3 Disponibilidad y Matriz. Se debe tener en cuenta un requerimiento oportuno o limitación en la entrega, ya que algunas de las resinas tienen que importarse, lo que consideraría tiempos de entrega mayores. Así como la matriz de la resina, ya que es importante tener en cuenta la disposición una vez tenga que reemplazarse el agente sólido de intercambio.

3.2.2.4 Costo de adquisición y Volumen de presentación. Los proveedores de RII manejan un volumen estándar de 25L, sin embargo, se pueden encontrar con volúmenes menores, por lo tanto, es un factor para considerar en la selección de la resina, ya que convendría mayores volúmenes a menores costos, el cual también es una variable indispensable para determinar la viabilidad del proyecto en caso de realizar una implementación futura del proceso, teniendo en cuenta que la resina a escoger cumpla con los objetivos del proyecto.

3.2.2.5 Porcentaje de retención de agua. Las RII con susceptibles de sufrir hinchamiento y por lo tanto se debe considerar este factor para evitar posibles problemas operacionales una vez implementado el proceso. Esta propiedad está ligada a la porosidad ya que al ser muy alta proporciona un acceso más fácil a iones de gran tamaño.

3.2.2.6 Vida útil. Las resinas después de varios ciclos de INI sufren la pérdida de sitios activos de intercambio o por la expansión y contracción durante las etapas de agotamiento y la regeneración sufren rotura disminuyendo su CI. Según literatura se asigna una vida útil entre los 5 y 10 años, sin embargo, esto puede variar respecto a las cantidades y la calidad de agua a tratar por la mina. Se esperaría que la vida útil de las resinas a utilizar sea alta ya que el agua residual de Mina 2 LTDA ya fue tratada en donde se disminuyó el porcentaje de sólidos y turbidez que inactivarían rápidamente las RII.

En la **Tabla 18** se estipulan las características de las resinas consultadas en las empresas GSA, Universal Osmosis y Biocidas & Químicos que servirán para la selección de la resina de intercambio iónico a partir de la matriz de selección primaria.

Tabla 18: Presentación criterios de selección de las RII

Resina Comercial	Capacidad de intercambio (meq/L)	Agente regenerante (g/L)	Disponibilidad	Costo (COP)	Volumen de presentación (Litros)	Estabilidad (pH)	Retención de agua (%)	Vida útil (Años)
Lewatit MonoPlus MP68	1,3	50 - 80	Si	\$166.500 + IVA	5	0 - 14	54 – 60	2
Lewatit MonoPlus M600	1,3	100	Si	\$174.500 + IVA	5	0 – 14	45 – 50	2
Lewatit MonoPlus M8000 OH	1,2	100	Si	\$202.500 + IVA	5	0 – 14	60 – 65	2
Amberlite IRA402 Cl	1,2	150	Encargo	\$700.000 + IVA	25	0 – 14	60	2
Lewatit MonoPlus M500	1,3	100	Si	\$800.000 + IVA	25	0 - 14	48 - 55	2

Fuente: Empresas Biocidas y Químicos S.A.S, GSA y Universal Osmosis

3.2.3 Matriz primaria de selección. Con base en la información técnica, de seguridad y económica proporcionada por las empresas distribuidoras consultadas de las resinas disponibles, se realiza una matriz primaria en donde se comparan las principales características y propiedades de cada una de ellas a través de los criterios de selección identificados en el numeral anterior, lo que permite la posterior selección de dos RII que van a ser evaluadas experimentalmente y comparadas, con el fin de establecer la resina más eficiente en el cumplimiento del objetivo principal del proyecto.

El método de la matriz primaria de selección se fundamenta en la búsqueda de la alternativa que posea la mayor calificación o valor multiobjetivo.⁶⁶ Es realizada a partir de los criterios de selección de resinas descritos anteriormente, en donde cada uno de ellos tiene un porcentaje de importancia de acuerdo con las condiciones impuestas en Mina 2 LTDA. Además del porcentaje, se cuenta también con una subclasificación en cada uno de los criterios según la conveniencia de este, siendo el valor de uno (1) no favorable para el criterio y el valor dos (2) favorable.

En la siguiente **Tabla 19** se presenta la manera en cómo se van a manejar los porcentajes de cada uno de los criterios de selección de las resinas de intercambio iónico, ya que fueron establecidos según la importancia que tiene cada uno de ellos en las operaciones de INI y las condiciones impuestas por la mina, para así poder proceder a la selección más adecuada de la resina que cumpla con la finalidad de reducción de sales en el agua residual de Mina 2 LTDA, para su uso en la agricultura.

⁶⁶ PERPIÑAN GUERRA, Adrian Augusto. Metodología para la evaluación y selección de alternativas de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua en el sector institucional. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Septiembre 19, 2013. p 35.

Tabla 11: Convenciones de la matriz primaria de selección

Ítem	Valoración	Valor ponderado
Capacidad de intercambio teórico	C.I \geq 2 meq/L, obtiene un valor de 2	35 %
	C.I $<$ 2 meq/L, obtiene un valor de 1	
Agente regenerante	Es comercialmente accesible, posee flexibilidad en la obtención y R $<$ 80 g/L, obtiene un valor de 2	10 %
	No es comercialmente accesible, no posee flexibilidad y R \geq 80 g/L, obtiene un valor de 1	
Porcentaje de retención de agua	% máximo de retención es \leq 60%, obtiene un valor de 2	10 %
	% máximo de retención es $>$ 60%, obtiene un valor de 1	
Disponibilidad y Matriz	Tiempo de entrega y volúmenes requeridos son suministrados en condiciones óptimas, matriz es de fácil disposición obtiene un valor de 2	11 %
	Existe alguna limitación en la entrega o volumen requerido, obtiene un valor de 1	
Costo de adquisición	Costo $<$ \$200.000, obtiene un valor de 2	15 %
	Costo de \geq \$200.000, obtiene un valor de 1	
Vida útil	Superior a 1 año, obtiene un valor de 2	10 %
	Inferior a 1 año, obtiene un valor de 1	
Volumen de presentación	Volumen \geq 25L, obtiene un valor de 2	9 %
	Volumen $<$ 25L, obtiene un valor de 1	

Fuente: Elaboración propia

Con los criterios establecidos, se realizó la siguiente matriz primaria de selección (**Tabla 20**), en donde se observa la subcategoría de favorabilidad de cada criterio (1 o 2) y el valor ponderado para cada una de las resinas de las cuales se tenía información.

Tabla 12: Matriz primaria de selección de resinas de intercambio iónico

	Capacidad de intercambio (meq/L)	Agente regenerante (g/L)	Disponibilidad y Matriz	Costo de adquisición (COP)	Porcentaje de retención de agua (%)	Vida útil (Años)	Volumen de presentación (L)	Total
	F VP	F VP	F VP	F VP	F VP	F VP	F VP	
Lewatiti Monoplus MP68	1 35	2 20	2 22	2 30	2 20	2 20	1 9	156
Lewatiti Monoplus M600	1 35	1 10	2 22	2 30	2 20	2 20	1 9	146
Monoplus M8000 OH	1 35	1 10	2 22	1 15	1 10	2 20	1 9	121
Amberlite IRA402 Cl	1 35	1 10	1 11	1 15	2 20	2 20	2 18	129
Lewatiti Monoplus M500	1 35	1 10	2 22	1 15	2 20	2 20	2 18	140

Fuente: elaboración propia

Donde:

F: Favorabilidad del criterio (1: No Favorable y 2: Favorable)

VP: Valor ponderado del criterio

A partir de la matriz primaria de selección (**Tabla 20**), se observa que la resina Lewatiti Monoplus MP68 es la mejor calificada al obtener un valor ponderado de 156 según los criterios establecidos. Esto es debido a que la resina Lewatiti Monoplus MP68 tiene una ventaja frente a los otros tipos de resina comparados en la matriz de selección, en cuanto a la cantidad de regenerante a usar para el restablecimiento de su capacidad de intercambio, por lo que es necesario utilizar menos de 80 g/L del regenerante, lo que incurriría en disminución de costos de operación.

3.2.4 Experimentación y dimensionamiento a escala laboratorio. Con la selección de la resina a partir de la matriz primaria, se procede a realizar la experimentación y el análisis cualitativo y cuantitativo para el dimensionamiento y determinación de las características de la resina seleccionada en un diseño de sistema de INI a escala laboratorio, que permitirá evaluar la eficiencia del proceso respecto a la calidad del agua para su reutilización en la agricultura aunado a las especificaciones para realizar el escalonamiento del sistema en su posible implementación, debido a que los diseños a partir de datos teóricos no brindan la certeza suficiente para el dimensionamiento, porque se manejan en condiciones iniciales sin tener en cuenta las posibles variaciones del agua a tratar y las condiciones externas de la mina que pueden afectar el proceso de INI.

Partiéndose de la comparación normativa legal - ambiental hacia la reutilización de aguas, se hace necesario el análisis del comportamiento de la conductividad que tiene una relación directa con la concentración de iones sulfato, mediante la variación del caudal y en consecuencia del volumen de agua presente en la torre de intercambio, a la hora de mantener un tiempo de retención, que igualmente determinará la capacidad de intercambio de la RII, tiempo de desagüe de la torre y especificación de regeneración enfocado hacia la viabilidad de esta propuesta en la reducción de iones sulfatos y disminución del parámetro de conductividad para la reutilización de este tipo de agua en la agricultura.

3.2.4.1 Cálculos para el dimensionamiento teórico. Para la facilidad de la experimentación, se adquirió la resina MonoPlus MP68 en una cantidad de 5 litros. Dado el costo de esta, se procedió a generar un montaje con base en cálculos donde se ejecutó igualmente en consecuencia, con las recomendaciones de uso impuestas por el distribuidor. Con ello, se da uso preliminarmente de una balanza previamente calibrada para la toma de una muestra de 1.86 kg de tal resina, para su posterior conocimiento del volumen que se utilizará dentro de la columna:

Ecuación 1. Volumen de resina

$$V_R = \frac{W_R}{\rho_R}$$

Fuente: RODRIGUEZ, A. LOPEZ, Y. RICO, L. CARRANZA, C. VALDES, B. Evaluation, modeling and optimization of fan ion Exchange column used in water treatment processes. (2015). *Afinidad LXXIII.(1).pp 210-218*

$$V_R = \frac{1.86 \text{ kg}}{0.62 \frac{\text{kg}}{\text{l}}}$$

$$V_R = 3 \text{ l} = 0.003 \text{ m}^3$$

Donde:

V_R : Volumen de resina utilizada

W_R : Peso de la resina

ρ_R : Densidad aparente de la resina

Determinado este volumen, se procedió a fijar la altura de la resina dentro la CII partiendo de un tubo PVC (comercial y de fácil alcance) de 10 cm de diámetro y con altura promedio de 1m:

Ecuación 2. Altura de lecho

$$H = \frac{V_R}{A_f} = \frac{V_R}{\frac{\pi * D_c^2}{4}}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 179 p.

$$H = \frac{0.003 \text{ m}^3}{\frac{\pi * 0.1^2}{4}}$$

$$H = 0.382 \text{ m}$$

Donde:

V_R : Volumen de resina utilizada

A_f : Área de flujo dentro de la CII

H : Altura de lecho (resina empacada)

D_c : Diámetro de la columna

Debido a la presencia de un aumento en el volumen del lecho por hinchamiento de la resina, se genera una nueva altura de lecho expandida al 21% en volumen (recomendación del proveedor)

Ecuación 3. Altura de lecho expandido

$$H_e = H + H * 21\%$$

Fuente:ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 179 p.

$$H_e = 0.382 \text{ m} + 0.382 * 0.21$$

$$H_e = 0.462 \text{ m}$$

Donde:

H: Altura de lecho (resina empacada)

H_e: Altura expandida de lecho

De la misma manera, se evalúa la altura de la CII partiendo de la existencia de un volumen de 0.001m³ de resina inactiva en la parte superior, que actúa como medio filtrante de contaminantes sólidos de gran tamaño y gran influyente en los procesos de regeneración:

Ecuación 4. Altura de resina inactiva

$$H_{in} = \frac{V_i}{A} = \frac{V_i}{\frac{\pi * Dc^2}{4}}$$

Fuente:ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 180 p.

$$H_{in} = \frac{0.001m^3}{\frac{\pi * 0.1^2}{4}}$$

$$H_{in} = 0.127 \text{ m}$$

Donde:

H_{in} : Altura resina inactiva

V_i : Volumen de la resina inerte

H_{in} : Altura resina inactiva

D_C : Diámetro de la columna

Ecuación 5. Altura de lecho total

$$H_l = H_t - H_e - H_{in}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 180 p.

$$H_l = 1m - 0.462m - 0.127m$$

$$H_l = 0.411m$$

Donde:

H : Altura de lecho (resina empacada)

H_e : Altura expandida de lecho

H_{in} : Altura resina inactiva

H_l : Altura espacio libre

A continuación, se resumen los cálculos del diseño de la CII con la que se trabajó a escala laboratorio para evaluar la eficiencia del proceso seleccionado:

Tabla 13. Diseño de la columna experimental

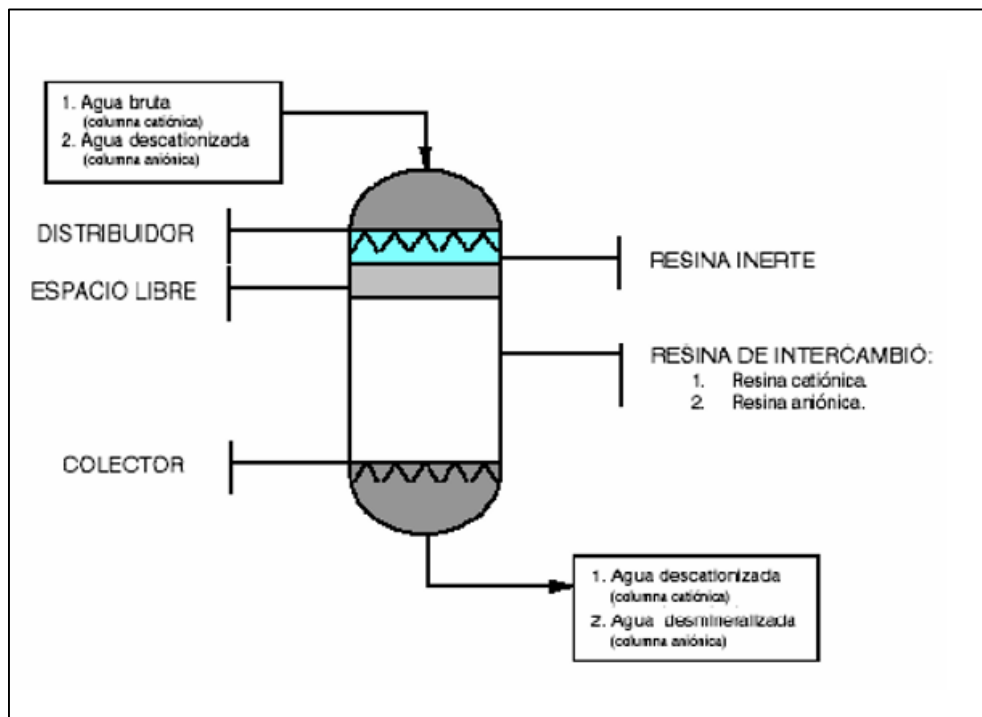
Altura de la columna	H_C (m)	1
Diámetro de la columna	D_C (m)	0.100
Volumen de lecho (resina)	V_R (m ³)	0.003
Altura del lecho	H_L (m)	0,382
Altura de lecho expandido	H_e (m)	0.462
Volumen resina inactiva	V_{in} (m ³)	0.001
Altura de resina inactiva	H_{in} (m)	0.127
Altura espacio libre	H_l (m)	0.411

Fuente: elaboración propia

La **Ilustración 22** muestra un esquema de una CII simplificada, con el que se trabajará a escala laboratorio, en donde el agua residual y la solución regenerante acceden a la columna por la parte superior, distribuyéndose a lo largo de toda la columna, la cual no se rellena en su totalidad con la resina, debido a que se deja un espacio libre sobre el lecho para permitir la expansión del mismo (hinchamiento), aspecto considerado en los cálculos realizados previamente en el diseño. El agua tratada se recoge en la parte inferior mediante un sistema de drenaje prevista de una válvula de globo para la buena recolección de la muestra.

Las columnas de intercambio deben diseñarse considerando la pérdida de carga que se produce en el lecho, optimizando la altura del lecho o seleccionando cuidadosamente el tamaño de partícula. También deben procurar la distribución homogénea del líquido (agua de alimentación o solución regenerante) en el conjunto del lecho mediante el correcto dimensionamiento de las velocidades de trabajos (**ANEXO H**)⁶⁷.

Ilustración 22. CII simplificada



Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso [En línea] <<https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6484/33287132.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> [citado el 01 de marzo del 2019]

⁶⁷ SANCHEZ, Concepción. Ficha técnica de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Universidad Da Coruña. Septiembre de 2015. p 8.

3.2.4.2 Experimentación a escala laboratorio . Una vez obtenidos los resultados para realizar el dimensionamiento de la CII a escala laboratorio, se realizaron pruebas experimentales con la resina Lewatiti MonoPlus MP68 con el fin de evaluar la eficacia del tratamiento en cuanto a la disminución del contenido de sales para la reutilización de este tipo de agua en la agricultura, identificar la capacidad de intercambio debido a que esta propiedad puede alejarse en gran medida de lo reportado en la información técnica obtenida por el proveedor y establecer parámetros que se deben tener en cuenta para el diseño final de la columna.

El proceso experimental consistió en cuatro etapas, iniciando con la activación de la resina con hidróxido de sodio (NaOH), seguido de la construcción de la columna a escala piloto a partir de los datos calculados y algunos obtenidos en la literatura, luego se hizo la toma de muestras cada 15 minutos del efluente de Mina 2 LTDA durante el cual las resinas entraban en contacto a 3 diferentes caudales, y por último las respectivas mediciones para cada muestra de dos parámetros de importancia en el proyecto, la conductividad para evaluar la aplicabilidad del proceso en cuanto a los objetivos planteados y el pH debido a que este tipo de resinas intercambia aniones por iones hidroxilo con lo que el pH de salida del agua se hace más básico y es necesario controlar este parámetro dentro de los límites permitidos de riego en Colombia. Las fases de operación para la experimentación realizada se muestran a continuación:

➤ **Activación de la resina MonoPlus MP68.** La resina MonoPlus MP68 es una resina intercambiadora de aniones, macroporosa, débilmente básica, con una distribución granulométrica uniforme que la hace química y mecánicamente muy estable, a base de un copolímero de estireno divinilbenceno⁶⁸. Su aspecto es de color Beige opaco y sus granos son de un tamaño muy pequeño, lo que favorece el proceso de intercambio iónico. En el ANEXO H se puede encontrar la ficha técnica de esta resina y algunas recomendaciones para su funcionamiento.

La resina MonoPlus MP68 fue suministrada por la empresa Biocidas y Químicos S.A.S en un volumen de presentación de 5L sin ser activada, por lo que fue recomendado por el proveedor activar la resina con una solución de 0,08 Kg de Hidróxido de Sodio (NaOH) en agua, para esta activación se empleó un recipiente que contenía la solución en donde se situaron tres telas filtrantes que contenían 1L de resina cada una, dejándola en contacto por 15 minutos como requerimiento por parte del proveedor.

⁶⁸ LENNTECH. Información de producto. LEWATIT MonoPlus MP68. Edición Octubre del 2012. Disponible en: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Lewatit-MonoPlus-MP-68-SP-L.pdf>

Ilustración 23. Resina Monoplus MP68



Fuente: elaboración propia

Ilustración 24. Activación de la resina



Fuente: elaboración propia

➤ **Construcción de la unidad piloto.** Para la construcción del prototipo se utilizó un tubo PVC de 1m de largo, con un diámetro de aproximadamente 10 cm, el cual estaba tapado en la parte superior e inferior que servía como soporte del material filtrante. Para la entrada y salida del flujo de agua en la columna se perforaron dos orificios en los dos extremos del tubo PVC para acoplar las mangueras correspondientes, y a estas a su vez se les adaptó una válvula de bola para regular el caudal de entrada y salida del agua residual a la columna en forma uniforme.

El prototipo contenía unas esferas de poliestireno reticulado de 0,55 mm de diámetro correspondiente a la resina inactiva con una altura de 0,127 m ubicada en la parte superior de la columna, con el fin de impedir que la resina a utilizar en el intercambio iónico escape de la columna durante el proceso de regeneración a contracorriente, además el uso de resina inerte, permite que la suciedad, los sólidos

retenidos y los fragmentos de finos producidos por la rotura de la resina pasen a través de ella, reteniendo las partículas completas de resina activa.⁶⁹ En la parte inferior de la columna se sitúa un lecho con una altura de 0,382 m de resina de intercambio previamente activada, dejando un espacio libre entre la resina inerte y activa de 0,411 m teniendo en cuenta el porcentaje de hinchamiento que la resina puede presentar durante los ciclos de operación. Este montaje fue construido a partir de los datos calculados previamente en el dimensionamiento a escala laboratorio y puede ser observado en las siguientes ilustraciones:

Ilustración 25. Unidad piloto para el INI



Fuente: elaboración propia

Ilustración 26. Válvula de bola



Fuente: elaboración propia

➤ **Toma de la muestra de agua.** El agua con la que se van a realizar las pruebas para determinar las propiedades principales de las resinas y evaluar el funcionamiento del intercambio iónico en la mejora de la calidad del agua para su reúso en la agricultura es proporcionada por la empresa Mina 2 LTDA, esta fue tomada después del último proceso del tratamiento convencional hasta ahora adoptado por la Mina donde sus características fisicoquímicas fueron evaluadas en el CAPÍTULO I del presente proyecto y cargada a nuestro diseño de la CII por medio de una válvula que regulaba el caudal de entrada de agua a la columna.

Para el análisis del proceso de intercambio, se tomaron 5 muestras de agua mediante intervalos de tiempo de 15 min de retención dentro del diseño estructurado para los tres valores de caudales diferentes seleccionados (**Tabla 21**), con el fin de evaluar el comportamiento de las resinas de intercambio iónico según el caudal y la retención a lo largo de toda la columna dada por el mecanismo de apertura y cierre de la válvula de salida montada en la CII, que garantizaba el contacto con el agua durante el tiempo seleccionado para cada muestra. Para el aforo de los caudales se tomó el un recipiente de 600ml conectado al mismo tubo y válvula de la entrada

⁶⁹ ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 189 p.

a la CII, con la finalidad de manipular la válvula y generar tres caudales de entrada diferentes tomando claramente, el tiempo que tardaría tal recipiente en llenarse. Luego se volvía a conectar el tubo de entrada a la columna y se procedía con la toma de las muestras durante tres momentos diferente enfatizados más adelante.

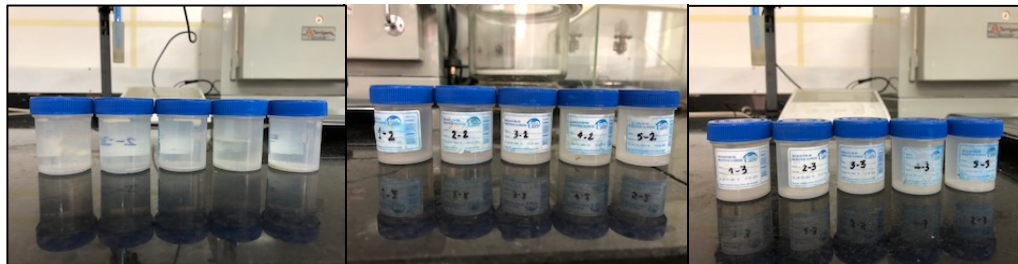
Tabla 14. Medición de aforo del caudal

Volumen (mL)	Tiempo 1 (seg)	Tiempo 2 (seg)	Tiempo 3 (seg)	Promedio tiempo(seg)	Caudal (mL/s)
600	10.18	10.20	10.19	10.19	58.88
600	15.49	15.52	15.54	15.52	38.66
600	37.13	37.03	37.05	37.07	16.19

Fuente: elaboración propia

Las muestras fueron tomadas directamente en Mina 2 LTDA, en el Municipio de San Mateo en Boyacá obedeciendo a las recomendaciones de acopio de muestras de agua enjuagando el contenedor varias veces primero con el agua de la cual se iba a tomar la muestra y fueron contenidas en recipientes hechos de polietileno; una vez tomadas las muestras se tuvo que adoptar técnicas de conservación (Refrigeración) para retardar los cambios químicos que pueden suceder después de que se toma la muestra, y reducir la posibilidad de error, ya que para su análisis fueron transportadas a la ciudad de Bogotá aproximadamente 4 días después del acopio en los recipientes. El método de prevención recomendado, tipo de contenedor y tiempo máximo de espera para la conservación de la muestra de manera correcta fueron seleccionados del Manual de análisis de agua (HASH), que proporcionaba recomendaciones para distintos componentes, evidenciado en el **ANEXO I**.

Ilustración 27. Muestras de ARM

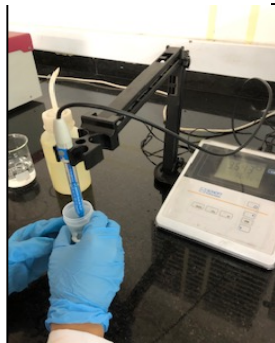


Fuente: elaboración propia

Las anteriores imágenes representan las 5 muestras tomadas a diferentes tiempos de retención y a tres caudales, 58,88 mL/seg, el cual corresponde al 100% de apertura de la válvula, 38,66 mL/seg y 15,19 mL/seg que corresponden a una apertura menor de la válvula.

➤ **Resultados y análisis de la experimentación.** Se determinaron los parámetros de conductividad y pH de las muestras después del tratamiento, para así poder evaluar la eficiencia de la alternativa propuesta y establecer variables de interés como lo son tiempos de residencia, caudal con mejores resultados en el proceso, cantidad de regenerante y tiempo en que se debe hacer la reactivación de la resina que son parámetros de importancia en el escalonamiento del diseño planteado en el proyecto. Los instrumentos utilizados se obtuvieron del laboratorio de la Fundación Universidad de América, y se pueden observar en las siguientes ilustraciones:

Ilustración 29. pH-metro



Fuente: elaboración propia con base en. Laboratorios FUA

Ilustración 28. Conductímetro



Fuente: elaboración propia con base en. Laboratorios FUA

Para la realización del análisis se empleó un pH-metro (**Ilustración 29**), que una vez calibrado el instrumento se procedió a la medición del pH de las 15 muestras de agua empleando agua destilada para lavar el electrodo antes de la medición de cada muestra. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 22**.

Tabla 15. Resultados del pH de las muestras

Caudal (mL/seg)	No. Muestra	Tiempo de retención	pH
Q1 = 58,88	1	0 min	8,7
	2	15 min	9,3
	3	30 min	9,5

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. (Continuación)

Caudal (mL/seg)	No. Muestra	Tiempo de retención	pH	
Q2 = 38,66	4	45 min	9,6	
	5	60 min	9,7	
	0	0 min	8,7	
	1	15 min	10	
	2	30 min	10,4	
	3	45 min	10,8	
	4	60 min	12,4	
	5	75 min	12,5	
	Q3 = 15,19	0	0 min	8,7
		1	15 min	9,8
2		30 min	10	
3		45 min	12,3	
4		60 min	12,5	
5		75 min	12,6	

Fuente: elaboración propia

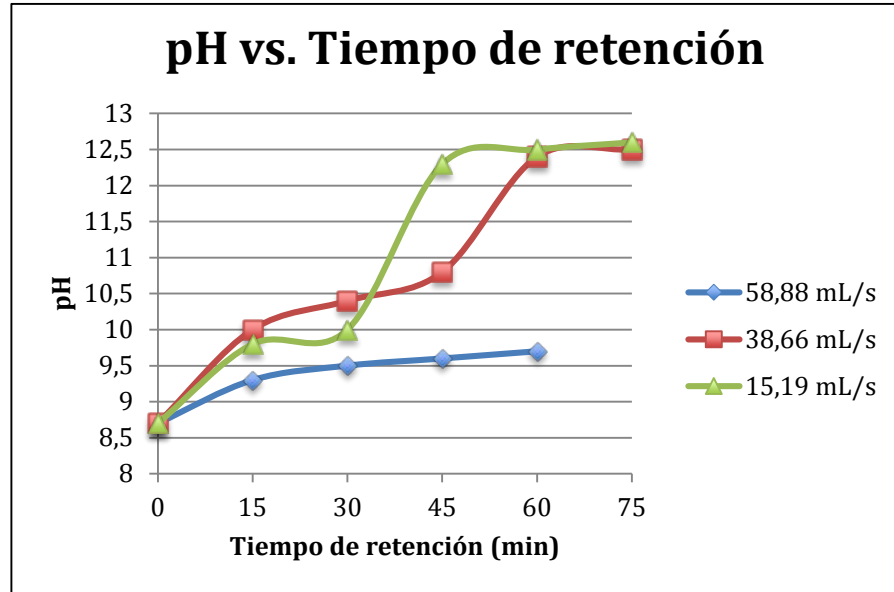
Una vez obtenidos los datos se procedió a realizar una gráfica (**Ilustración 30**), en la herramienta computacional (Microsoft Excel) que evidencia el comportamiento del pH del agua residual de Mina 2 LTDA una vez tratada con el proceso de intercambio iónico con respecto al tiempo de retención en la CII diseñada.

En esta gráfica se puede observar que para los tres caudales manejados en la experimentación, el pH del agua presenta un incremento a medida que el tiempo de retención en la columna se hace mayor, dado que al presentar un intercambio aniónico en el presente proceso, las RII (R-OH)⁷⁰ acogen aniones del fluido minero, dejando iones hidroxilo (**Reacción 6**) en el afluente, lo que generará la presencia de una disolución básica dada por la acumulación alta de iones hidroxilos en el

⁷⁰ ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 40 p.

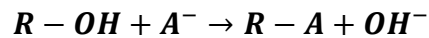
fluido, generando una variación del pH en el rango 8 -14, como lo es evidente en la experimentación de este trabajo.

Ilustración 30. Comportamiento del pH respecto al tiempo de retención



Fuente: elaboración propia

Reacción 6. Comportamiento de la resina aniónica



Fuente: Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 35 p.

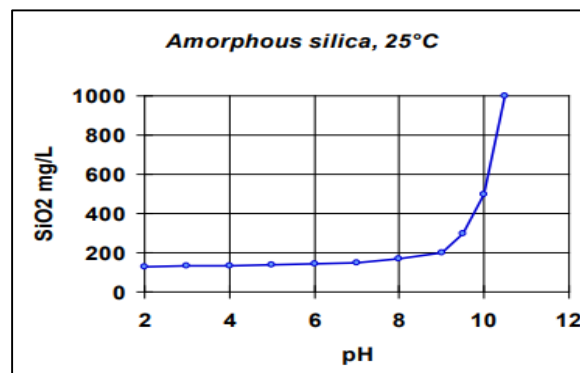
Para los tres casos particulares, la variación en el pH básico fue notoria aproximándose a un máximo de 13 en los dos casos con caudales menores. No se puede dejar atrás igualmente en este caso, que al presentarse una regeneración en los dos últimos procesos, partículas de hidróxido de sodio (NaOH) en la solución regenerante, no diluyeron completamente lo que aportarían de igual manera en el aumento del pH del agua tratada, dado que este agente denominado también como soda cáustica "sosa", es una base fuerte⁷¹ por lo que un exceso o una mala dilución, afectaría directamente los resultados como es el caso presentado, esencialmente se denotaría como una fuga sódica en la que los cationes sodio (Na⁺) estrarían por

⁷¹ ZABALA, Patricia. Evaluación del proceso de estabilización del pH del agua tratada del río cauca. Trabajo de investigación, grupo de investigación ECCA. Universidad del Valle. 2014. 8p

encima de los permitido y por ende reaccionarían directamente con los iones OH⁻ en exceso, produciendo la solución básica de NaOH, incrementado de este modo el pH del agua tratada.

Otro de los factores que acarrea tal la variación en el pH en el agua tratada de la mina, se basa en naturaleza de su proveniencia al presentar otro contaminante en esta ocasión para la RII denominado dióxido de sílice (SiO₂) el cual al ser un mineral de abundancia en la corteza terrestre se presenta como uno de los contaminantes de mayor tensión junto con el polvillo de carbón en esta industria en específico al contribuir con la aparición de la enfermedad “neumoconiosis” (enfermedad pulmonar que conlleva a limitaciones funcionales severas)⁷² en el personal minero. Pero no solo se prolonga como polvo en aire, sino que se presenta como ácido silícico (H₂SiO₄) al disolverse en el agua, como en este caso. Este componente no afecta la calidad del agua, pero interviene en el proceso de INI al afectar en el funcionamiento de la columna, por eso es necesario tener un control en este parámetro a la hora del funcionamiento del proceso de intercambio iónico, para que no se aumente notablemente el pH del efluente a tal punto de sobrepasar los límites de riego en el país.

Ilustración 31. Comportamiento de ácidos silicios



Fuente: DOW GAMMA QUIMICOS. Sílice en sistemas de intercambio iónico, acumulación [En línea]< <http://www.quimicagamma.com/wp/wp-content/uploads/2016/09/3-S%C3%ADlice-SiO2-Rev-RM.pptx.pdf> > [citado el 28 de marzo del 2019]

En la **Ilustración 31** se observa que a pH inferiores a 8, los ácidos silicios están muy débilmente ionizados frente a las características del agua, lo que denota un buen funcionamiento de la CII, pero a medida que el afluente se va volviendo más

⁷² SEGURIDAD MINERA. Silicosis, actividades con exposición potencial y de riesgo[En línea]<<http://www.revistaseguridadminera.com/salud-ocupacional/silicosis-exposicion-potencial-y-de-riesgo/> > [citado el 28 de marzo del 2019]

básico dada la explicación debidamente mencionada, se presentará una polimerización y acumulación de sílice en la resina aniónica, afectando directamente con su capacidad de intercambio⁷³.

El otro de los parámetros de gran importancia en nuestro proyecto es la conductividad, la cual fue medida en laboratorio haciendo uso de un conductímetro manual (**Ilustración 29**), que realizaba la medición por contacto con el agua de cada muestra tomada, los resultados obtenidos para cada una de las muestras son se encuentran en la **Tabla 23**

Tabla 17. Resultados de la conductividad de las muestras

Caudal (mL/seg)	No. Muestra	Tiempo de retención	Conductividad (µs/cm)
Q1 = 58,88	1	0 min	3999
	2	15 min	1408
	3	30 min	1380
	4	45 min	1348
	5	60 min	1020
Q2 = 38,66	0	0 min	3999
	1	15 min	1703
	2	30 min	1563
	3	45 min	1626
	4	60 min	1680

Fuente: elaboración propia

⁷³ DOW. Sílice en sistemas de intercambio iónico, acumulación [En línea]<
<http://www.quimicagamma.com/wp/wp-content/uploads/2016/09/3-S%C3%ADlice-SiO2-Rev-RM.pptx.pdf> > [citado el 28 de marzo del 2019]

Tabla 18. (Continuación)

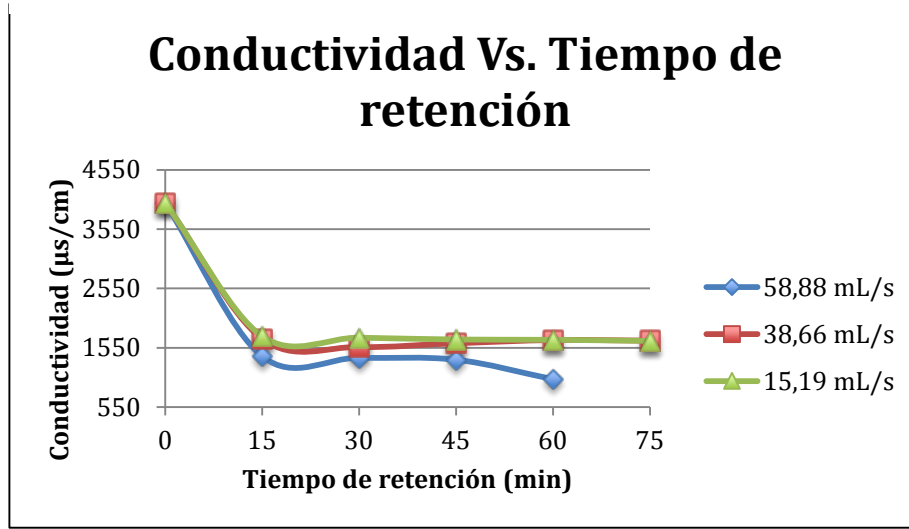
Caudal (mL/seg)	No. Muestra	Tiempo de retención	Conductividad ($\mu\text{s/cm}$)
	5	75 min	1670
Q3 = 15,19	0	0 min	3999
	1	15 min	1745
	2	30 min	1720
	3	45 min	1689
	4	60 min	1684
	5	75 min	1665

Fuente: elaboración propia

Una vez obtenidos los datos se procedió a realizar una gráfica (**Ilustración 32**) en la herramienta computacional (Microsoft Excel) que evidencia el comportamiento de la conductividad del agua residual de Mina 2 LTDA una vez tratada con el proceso de intercambio iónico con respecto al tiempo de retención en la CII diseñada, parámetro de gran importancia, debido a que evalúa la eficiencia del proceso planteado en el Proyecto de Grado.

Para los tres casos se observa que el agua residual una vez retenida en la CII presenta una reducción en su conductividad, debido a que está cumpliendo su función de retener algunos aniones como los sulfatos que son generadores de la alta conductividad de este tipo de aguas, sin embargo a medida que el tiempo de retención es más alto, el cambio en la conductividad no es tan pronunciado, ya que en la resina se van agotando los sitios libres para cargar los iones de la solución, es decir, la capacidad útil de la resina va disminuyendo con el tiempo en los tres casos estudiados con diferente caudal. Cabe aclarar que, con los tiempos de retención tomados en esta primera fase de experimentación, la resina no ha entrado en la etapa de agotamiento, por lo que la conductividad sigue variando notablemente.

Ilustración 32. Comportamiento de la conductividad Vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Con los resultados obtenidos de la experimentación también se puede justificar que la resina aniónica débil reacciona de manera variable según el caudal, ya que se distingue que a caudales mayores se obtienen mejores resultados en cuanto a la variación en la conductividad del agua, llegando a valores menores a $1500\mu\text{s}/\text{cm}$ en tiempos de retención más cortos, en donde se cumpliría con los parámetros de riego en el país; esta influencia de caudal es debido a que al aumentarlo, se alarga la zona de reacción provocando que el proceso de INI sea mucho más rápido, sin embargo al manejar entonces caudales altos, se llegará a la fase de agotamiento en menor tiempo.

En el gráfico de la **Ilustración 32** se muestra una caída de la conductividad para los caudales de $38,66\text{ mL/s}$ y $15,19\text{ mL/s}$ a partir de tiempos de retención mayores a 20 min, esto ocurre por la regeneración realizada antes de tomar estas muestras, que al no ejecutarse correctamente por errores humanos en la mala regeneración de la resina, ocasiona una fuga sódica (NaOH) en los cationes por encima de la permisible, obteniéndose pH mayores a 9 en el efluente y provocando una diferencia de conductividad mínima por el efecto de esta base fuerte, debido a que evidenciado en la **Tabla 23**, perdiendo capacidad de intercambio y generando bajas eficiencias a diferencia de las que se presentaron con el flujo inicial.

Una vez realizado el análisis de pH y conductividad a los tres diferentes caudales manejados se concluyó que con el 100% de apertura de la válvula de entrada a la CII (caudal más grande) se obtuvieron los mejores resultados para los objetivos planteados en el presente proyecto en cuanto a la disminución de la conductividad y con ello el contenido de sulfatos en el agua residual de Mina 2 LTDA, debido a la relación directa de estos parámetros (**Tabla 13**). Se procedió entonces a evaluar la capacidad de intercambio de la resina LEWATIT Monoplus MP 68 por medio de la

toma de 8 muestras cada 15 minutos durante una 1 hora y 45 minutos al caudal seleccionado con los mejores resultados en la experimentación (58,88 mL/s), a las cuales se les realizó una nueva medición de conductividad que fue expresada en dureza, con el fin de realizar una comparación teórica del comportamiento de la resina en cuanto a su capacidad de intercambio, que es un factor importante a tener en cuenta para la obtención del volumen de resina y de las dimensiones de la columna en el diseño escalonado.

Ecuación 6. Capacidad de intercambio

$$CI = \frac{Q * T * D}{V}$$

Fuente: SANCHEZ, Mario. DUARTE, Antonio. Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial. (2015). Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario. Universidad la Salle de Bogotá. 32-40 pp.

Donde:

CI: Capacidad de intercambio

T: Tiempo de regeneración

D: Conductividad expresada en dureza del agua

V: Volumen de resina utilizada

Tabla 19. Análisis de las muestras al mejor caudal

Caudal (L/min)	Muestra	Tiempo de retención (min)	Conductivida d (µs/cm)	Dureza (eq CaCO3/l)	CI (eq/l)
3,5328	1	0	3999	0.03999	2.7089
	2	15	1430	0.0143	0.9687
	3	30	1405	0.01405	0.9517

Fuente: elaboración propia

Tabla 20. Análisis de las muestras al mejor caudal

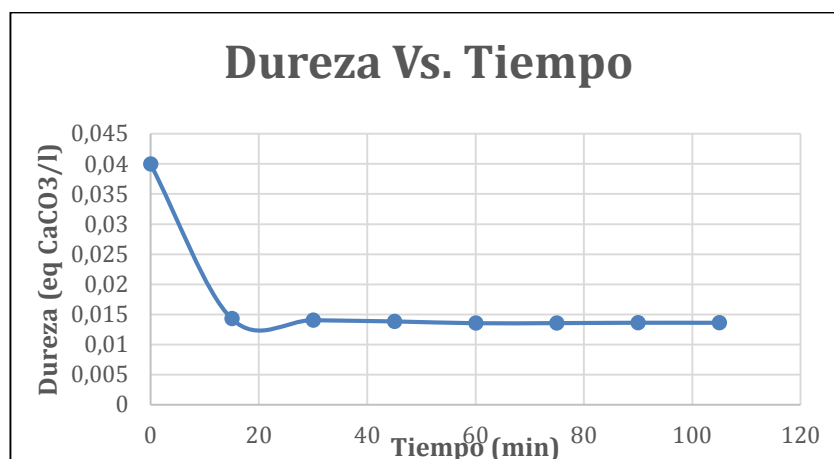
Tabla 21. (Continuación)

Caudal (L/min)	Muestra	Tiempo de retención (min)	Conductivida d (µs/cm)	Dureza (eq CaCO₃/l)	Cl (eq/l)
	4	45	1385	0.01385	0.9382
	5	60	1355	0.01355	0.9178
	6	75	1357	0.01357	0.9192
	7	90	1363	0.01363	0.9232
	8	105	1362	0.01362	0.9225

Fuente: elaboración propia

Posterior a los cálculos realizados de dureza y capacidad de intercambio para cada una de las muestras tomadas se realizó una gráfica en la herramienta computacional (Microsoft Excel) que evidencia el comportamiento de la dureza del agua residual de Mina 2 LTDA una vez tratada con el proceso de intercambio iónico con respecto al tiempo de retención en la CII diseñada (**Ilustración 24**) con el fin de establecer una comparación con datos teóricos suministrados en el ANEXO J.

Ilustración 33. Comportamiento de la dureza respecto al tiempo



Fuente: elaboración propia

La capacidad de intercambio operativa de la resina es el número de sitios donde se produce el intercambio iónico durante la fase de agotamiento o de saturaciones⁷⁴ y es reportada en la ficha técnica de la misma (**ANEXO H**). Por su importancia en el

⁷⁴ FRANÇOIS DE DARDEL. Capacidad de intercambio. [en línea] <http://dardel.info/IX/capacity_ES.html#practice> [citado el 25 de mayo de 2019].

proceso de INI se evaluó el comportamiento de este factor (conductividad expresada en términos de dureza) con respecto al tiempo de retención en la columna mediante datos experimentales evidenciados en la **Tabla 24**, observándose que a medida que el tiempo de retención se hacía mayor había una pérdida en su capacidad de intercambio útil u operativa, consecuencia de la pérdida de sitios libres en la resina que están siendo ocupados por los iones de ácidos fuertes que se quieren eliminar en el agua residual de Mina 2 LTDA (sulfatos), sin embargo a partir de los cálculos de este parámetro y los de dureza se pudo establecer que durante el tiempo de experimentación (1 hora y 45 min) no se ha llegado a la saturación completa de la resina, debido a que la disminución en su capacidad operativa no es tan significativa y en el agua tratada por el proceso de intercambio no ha ocurrido un aumento en su conductividad o dureza, situación que conllevaría a una etapa de agotamiento de la capacidad de intercambio y su posterior regeneración. El comportamiento esperado se describe en **ANEXO J** donde resulta una desactivación de la resina a un volumen procesado. De igual manera este comportamiento se estimaría siempre y cuando se ostente un procesamiento continuo y no a batch como se realizó experimentalmente.

➤ **Análisis de resultados frente al tratamiento utilizado de las aguas residuales.** La utilización de resinas de intercambio iónico durante la práctica, responde a la necesidad de mejorar la calidad del agua minera partiendo en la búsqueda de eliminar sólidos disueltos (sales metálicas, sulfatos) por medio de una reacción reversible⁷⁵ donde se da el intercambio de iones naturales del afluente tratado, con iones de igual signo de una partícula sólida (en este caso resina aniónica débil) presente en una columna (método de operación resinas de intercambio iónico) condicionando el equilibrio a medida que se presenta el flujo descendente del agua por este. Dado el análisis de los primeros capítulos, estos componentes interfieren directamente en la salinidad del fluido medido por el parámetro de conductividad, que, al presentar altos niveles, no se podrá dar su uso en temas agrícolas y de igual manera su limitación para vertimientos. Dado esto, se procedió en la verificación de la efectividad en el uso de resina de intercambio iónico como tratamiento alterno en la PTAR de Mina 2 LTDA.

A partir de la tabla de resultados y las gráficas obtenidas de la experimentación, es indiscutible que se presentó notoriamente la mejora en conductividad frente a la expuesta en la **Tabla 12** (resultados fisicoquímicos del agua residual en el año 2019) con un valor de 4350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, considerada altamente conductiva, para su uso agrícola. Partiendo de estos resultados, en el caso de los tres flujos presentes en la experimentación, se tiene que a mayor velocidad de flujo, mayor va existir el contacto entre el agua de ingreso con la resina inmóvil dentro de la CII, esto a diferencia de los otros dos flujos, expresa que al tener un tiempo de retención y un volumen de agua en contacto más alta, se presenta una eficiencia mayor frente a la

⁷⁵MORENO IBAÑEZ, WILLIAM. Recuperación de hierro y ácido clorhídrico de medios decapantes agotados. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Central del Ecuador, Ecuador. 2015. 12-13 p.

capacidad de intercambio de la resina, llegando tal punto en que a un tiempo de 60 min de la última muestra del flujo inicial, este parámetro se encuentra por debajo de los 1500 μ S/cm requerido legalmente para reusó agrícola (**ANEXO C**).

Finalmente, mediante un análisis de la varianza con un factor (ANOVA) al presentarse tres caudales diferentes con sus respectivas repeticiones (5 muestras), se verificó si se difiere o no las poblaciones frente al factor de análisis, que en este caso corresponden a conductividad y pH. Para ello se establecen dos hipótesis, una nula y la otra alternativa con la finalidad de verificar si el tipo de caudal va a influir o no en los resultados de tales parámetros:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \dots \mu_n$$

Hi: por lo menos 2 μ son diferentes

Donde:

Ho: Hipótesis nula

Hi: Hipótesis alternativa

Determinado esto, se procedió a realizar los cálculos pertinentes, partiendo de la **Tabla 24** que se presenta a continuación:

Tabla 22. Datos ANOVA

REPETICIONES	Q1	Q2	Q3
1	3999	3999	3999
2	1408	1703	1745
3	1380	1563	1720
4	1348	1626	1689
5	1020	1680	1684

Fuente: elaboración propia

Los cálculos arrojados por este análisis estadístico **Tabla 25** se resumen a continuación:

Tabla 23. Resultados del ANOVA

MEDIA GLOBAL	C	62'273,131.3
SUMA DE VARIANZAS	SCT	14'948,695.7
VARIABILIDAD ENTRE GRUPOS	SCA	326,995.733
VARIABILIDAD DENTRE DE GRUPOS	SCE	14'621,700
NÚMERO DE DATOS(CONDUCTIVIDAD)	n	15
REPETICIONES O MUESTRAS	r	5
CAUDALES	k	3
MEDIA CUADRADA DE LA VARIABILIDAD EG	MCA	163,497.867
MEDIA CUADRADA DE LA VARIABILIDAD DG	MCE	1'218,475
FACTOR DE FISHER-SNEDECOR	F	0.13418237

Fuente: elaboración propia

Partiendo de la **Tabla 25**, la hipótesis nula (H_0) se rechaza si $F_{Práctico} > F_{Tabla Fisher-Seenedecor \text{ ó } 0.5, k-1, n-k}$ (**ANEXO I**); de lo contrario se tomaría la hipótesis alterna (H_i).

$$F_{0.5, k-1, n-k} = F_{0.5, 2, 16} = 3.634$$

Ya con esto se obtuvo lo siguiente

$$0.134 < 3.634$$

Tomado este resultado, la hipótesis H_0 no se desprecia, por lo que se infiere que sin importar los caudales que se tomen durante la práctica el valor de la conductividad es independiente del caudal medido, por lo que se presenta otra conclusión frente a la factibilidad de las resinas aclarando, que es bueno tener presente los cálculos realizados en capítulos anteriores ya que se presentan recomendaciones para un buen uso.

4. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO

Partiendo de los resultados de la experimentación que concluyeron en la efectividad del proceso de INI con la resina Lewatiti Monoplus68, se procede a dimensionar la CII dada las condiciones de trabajo en la sociedad minera, dar las especificaciones operacionales y técnicas de mayor influencia del proceso y analizar cada una de las etapas del proceso requeridas para el tratamiento de la conductividad sobre el efluente de agua de Mina 2 LTDA.

4.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA UNIDAD BÁSICA DE INTERCAMBIO IÓNICO

El equipo de tratamiento para la operación consiste en dos columnas cilíndricas cerradas, las cuales están diseñadas con las mismas características, en cuyo interior la resina entra en contacto con el agua a tratar y la solución regenerante, alternativamente, es decir, una columna realiza el proceso de INI mientras que la otra se encuentra sin operar hasta que la columna inicialmente trabajada se sature y entre al proceso de regeneración, y así alternando las columnas de manera que se trate en forma continua el efluente de la mina. Para la entrada y salida del flujo de agua o regenerante en los extremos de las columnas se deben acoplar las mangueras correspondientes, y unas válvulas de bola para regular el caudal de entrada y salida del agua residual a la columna en forma uniforme.

La operación de intercambio iónico se realiza habitualmente en semicontinuo, en un lecho fijo de resina a través del cual fluye una disolución. El régimen de funcionamiento no es estacionario por variar continuamente la concentración de los iones en cada punto del sistema.⁷⁶ Los cálculos para obtener el dimensionamiento de la columna está dada en los siguientes apartados:

4.1.1 Volumen de resina. Dada la finalidad del proyecto, se requiere estimar las condiciones preliminares para un buen diseño de una CII, para ello se utilizó la heurística de grados hidrotimétricos franceses (°F) con la finalidad de convertir datos de Cd al ser un parámetro predictivo, en términos de Du total (*Ecuaciones 7 y 8*) (Du temporal + Du permanente) que facilitaría el cálculo heurístico de la CII. Inicialmente se procedió a la obtención de la carga aniónica (Cani) presente en DAM, mediante el resultado de Cd del análisis FQ del agua residual en la etapa final del tratamiento donde fue tomada (tanque neutralización con cal) (*ANEXO G*).

⁷⁶ CAPITULO 3. Intercambio iónico. Modo de operación. p 14-16[En línea]<<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf> > [citado el 25 de mayo del 2019]

Ecuación 7. Relación con dureza

$$1^{\circ}F = 10 \text{ ppm de } CaCO_3$$

Fuente: CATRO, Juliana.
ZUÑIGA, Luis. ALVARADO, Darner.
Conductivity as a predictive parameter of hardness in groundwater and spring water of Costa Rica. (2017). *Tecnología en marcha*. Vol 31-1, Pag 35

Ecuación 8. Relación con conductividad

$$1^{\circ}F = 20 \mu S/cm$$

Fuente: CATRO, Juliana.
ZUÑIGA, Luis. ALVARADO, Darner.
Conductivity as a predictive parameter of hardness in groundwater and spring water of Costa Rica. (2017). *Tecnología en marcha*. Vol 31-1, Pag 36

Se procedió de la siguiente manera:

$$Cani = Cd * \text{factor de conversión } ^{\circ}F$$

$$Cani = 4350 \frac{\mu S}{cm} \times \frac{1^{\circ}f}{20 \frac{\mu S}{cm}} \times \frac{10 \text{ ppm de } CaCO_3}{1^{\circ}f}$$

$$Cani = 2175 \text{ ppm de } CaCO_3 \text{ o } \frac{mg \text{ } CaCO_3}{l} \times \frac{1 \frac{meq \text{ } CaCO_3}{l}}{50 \text{ ppm de } CaCO_3}$$

$$Cani = 43,5 \frac{meq \text{ } CaCO_3}{l}$$

Donde:

Cani: Carga aniónica

$^{\circ}F$: Grados hidrotimétricos Franceses

Cd: Conductividad

Para el caso de un caudal específico de 1.5 m³ por día (62.5 litros por hora) en la mina de carbón, se obtiene la capacidad operativa, la capacidad instalada y el volumen de la resina necesario para su buen funcionamiento:

Ecuación 9. Oferta iónica

$$IO = Cain * Q * tc$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 189 p.

$$IO = 0.0435 \frac{eq \text{ CaCO}_3}{l} * 62.5 \frac{l}{h} * 8 \frac{h}{ciclo}$$

$$IO = 21.75 \frac{eq \text{ CaCO}_3}{ciclo}$$

Donde:

IO: Oferta iónica

Cain: Carga aniónica

Q: Caudal de flujo

tc: Tiempo de duración por ciclo

La capacidad operativa (C_{op}) para el caso de la resina Lewatiti MonoPlus MP 68, presenta un valor mínimo de (dada por el distribuidor):

$$C_{op} = 1.3 \frac{eq}{l}$$

Ya con esto, es posible determinar el volumen necesario de resina aniónica (V_R):

Ecuación 10. Volumen de resina

$$V_R = \frac{OI}{C_{OP}}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 189 p.

$$V_R = \frac{21.75 \frac{eq \text{ CaCO}_3}{\text{ciclo}}}{1.3 \frac{eq}{l}}$$

$$V_R \approx 17 \text{ l} = 0.017 \text{ m}^3$$

Donde:

IO: Oferta iónica

C_{op} : Capacidad operativa

V_R : Volumen de resina

En este caso particular, sabiendo que el proveedor de la resina MP 68 (Biocidas y Químicos S.A.S) distribuye a esta en sacos de presentación de 5 litros, se presentara una aproximación estimada para el tratamiento de agua de Mina 2 LTDA de 4 sacos en volumen de resina.

4.1.2 Área de flujo de la columna. Para el análisis del área de flujo en la CII, se toma un diámetro específico usual de muchos estudios frente al dimensionamiento a escala piloto de estos procesos:

$$D_c = 0,15 \text{ m}$$

Ya con esto, se calcula el área de paso del fluido dentro de la CII:

Ecuación 11. Área de flujo dentro de CII

$$A_f = \pi * \frac{D_c^2}{4}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 191 p.

$$A_f = \pi * \frac{(0.15)^2}{4}$$

$$A_f = 0.01767 \text{ m}^2$$

Donde:

D_c : Diámetro de la columna de intercambio

A_f : Área de flujo dentro de la CII

4.1.3 Altura del lecho. Para este caso, el proveedor presenta una altura mínima de lecho (*ANEXO H*) para el funcionamiento recomendado de este proceso (0.8 m). Igualmente, se verifica para el escalonamiento este dato la siguiente ecuación:

Ecuación 12. Altura de resina en la CII

$$h_f = \frac{V_R}{A_f}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 191 p.

$$h_f = \frac{0.017m^3}{0.01767m^2}$$

$$h_f = 0.962m$$

Donde:

h_f : Altura de la resina en la CII

A_f : Área de flujo dentro de la CII

V_R : Volumen de resina utilizada

Es necesario resaltar, que al existir una variación en el volumen del 21% (estimado por el fabricante) por hinchamiento de la resina, se debe generar en el diseño una expansión (Ex) de esta magnitud en la altura:

Ecuación 13. Altura de lecho expandido

$$E_x = h_f * 0.21$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 192 p.

$$E_x = 0.962m * 0.21$$

$$E_x = 0.202m$$

Generando así una altura extendida del reactor aproximado (h_e):

$$h_e = E_x + h_f$$

$$h_e = 0.202m + 0.962m$$

$$h_e = 1.164 m$$

Donde:

h_f : Altura de la resina en la CII

E_x : Expansión del lecho

h_e : Altura extendida del lecho

4.1.4 Altura de la resina inerte. Por condicionamiento del proveedor de resina (**ANEXO H**), es necesario utilizar resina inerte con la finalidad de contribuir en la depuración de contaminantes como sólidos o suciedad presente en el afluente y al igual, de no permitir el paso de la resina activa o segmentos de esta mismas, durante los procesos de regeneración y nueva activación. A continuación, se realizan los cálculos pertinentes⁷⁷

⁷⁷ ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 191-192 p.

Ecuación 14. Altura de resina inerte en la CII

$$h_i = \frac{V_i}{A_f}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 192 p.

$$h_i = \frac{0.003m^3}{0.01767m^2}$$

$$h_i = 0.17 m$$

Donde:

h_i : Altura de la resina inerte

V_i : Volumen de la resina inerte dada por el proveedor

A_f : Área de flujo dentro de la CII

4.1.5 Altura de la columna. Habitualmente las columnas de intercambio iónico no se rellenan en su totalidad con la resina, sino que se deja un espacio libre sobre el lecho para permitir la expansión de esta a causa del hinchamiento por agua, esta especificación está dada según el tipo de resina y proveedor. Además, cuentan con una altura de resina inactiva que funciona como un depurador de contaminantes, se ve entonces necesario considerar estos factores para poder establecer la altura total de la columna, en donde se utilizará la siguiente ecuación:

Ecuación 15. Altura de la CII

$$H = h_i + h_e + h_{fb}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 193 p.

Donde:

H : Altura total de la columna

H_{fb} : Altura zona libre columna

h_i : Altura de la resina inerte

h_e : Altura de la resina expandida

A partir de los datos calculados en el literal 3.1.3. y 3.1.4 se obtiene la altura total de la columna:

$$H = 0.17m + 1.164m + 0.166m$$

$$H = 1.365m$$

A continuación, se evidencian los resultados de los cálculos del dimensionamiento de la columna (**Tabla 25**) en donde se observa la configuración interna de las CII, que se divide en tres zonas que cumplen la misma función de la columna planteada en la experimentación:

Tabla 24. Dimensionamiento a escala de la CII

Parámetro	Símbolo	Magnitud
Volumen de la resina (L)	V_R	17
Diámetro de la columna (m)	D_c	0.15
Área de flujo en la columna (m ²)	A_f	0.018
Altura de la resina inerte (m)	h_i	0.170
Altura de la resina activa en la columna (m)	h_f	0.962
Altura extendida de la resina activa en la columna(m)	h_e	1.164
Altura columna total (m)	H	1.365

Fuente: elaboración propia

4.2 ETAPAS DEL PROCESO

En las aplicaciones de intercambio iónico a escala industrial, los intercambiadores se utilizan en procesos cíclicos de operación hasta el agotamiento de la capacidad de intercambio de la resina, momento en el que se procede a la subsiguiente

regeneración de la misma⁷⁸. A continuación, se presenta una descripción y los cálculos del ciclo de trabajo de la operación que componen el proceso de INI, lo que permite la contextualización desde el punto de vista del diseño operacional en forma global.

4.2.1 Etapa de carga. En esta etapa tiene lugar el intercambio de iones entre la disolución a tratar y la resina. Un factor de verificación en esta etapa es la determinación de la velocidad de flujo para obtener un buen rendimiento en cuanto a la capacidad y selectividad, ya que, a las condiciones establecidas, este factor puede acarrear una buena distribución e interacción iónica para cumplir con lo requerido y manejo del caudal diario de la mina Q_t ($1.5 \text{ m}^3/\text{día}$):

Ecuación 16.
Velocidad de flujo

$$vel = \frac{Q_t}{A_f}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 198 p.

$$vel = \frac{0.0625 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{0.01767 \text{m}^2}$$

$$vel = 3.5371 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Donde:

vel: velocidad de flujo de entrada a la CII

Q_t : Caudal del agua en el tratamiento

A_f : Área de flujo dentro de la CII

⁷⁸INDITEX. Ficha técnica de etapas de proceso de planta de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Intercambio iónico. p 1-30[En línea]<
<https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Intercambio+iónico.pdf/a832c542-7c3a-4d31-789b-5f318eced659> > [citado el 25 de mayo del 2019]

Entonces la corriente de agua que sale del último tanque de neutralización debe ingresar por la parte superior a una velocidad de 3,5371 m/h y se hace circular a lo largo de toda la columna por efecto de la gravedad, en donde ocurre el intercambio de iones entre el agua residual y la resina Lewatiti Monoplus68, que se ubica en el fondo de la columna. El agua sale por la parte inferior del tanque garantizando que el caudal de entrada sea igual al de salida o tengan mínimas variaciones.

La resina en cierto tiempo comienza a estar saturada con los iones de la disolución que entra, evidenciado en un aumento de la concentración de dichos iones en el agua que sale de la columna. Esta descarga de iones se conoce como punto de ruptura (breakthrough) e indica que el tratamiento de la disolución por la resina ya no es efectivo⁷⁹, y se pierde su capacidad de intercambio, por lo tanto, debe ser regenerada.

El tiempo estimado teóricamente con el que la empresa contará para la determinación del momento aproximado en el que deberán regenerar la resina debido a que se superó la capacidad total de intercambio que se resume a una inactivación del proceso en general. Este cálculo considera pertinentemente la utilización de la dureza del agua a la entrada de la CII, por lo que, dado su desconocimiento, se procedió nuevamente a aproximar mediante la heurística de grados hidrotimétricos °F, el parámetro de conductividad del análisis FQ (**ANEXO G**) del agua a tratar. Igualmente se considera la capacidad total de intercambio de la resina expuesta por el proveedor (**ANEXO H**), y la cantidad de esta expresada en cálculos anteriores:

$$Du = 2175 \text{ ppm de CaCO}_3 \text{ o } \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{l}}$$

Se realiza la conversión a granos/ galón para facilitar cálculos más adelante obteniendo el siguiente resultado:

$$Du = 2175 \text{ ppm de CaCO}_3 * \frac{1 \frac{\text{granos}}{\text{gal}}}{17.1 \text{ ppm de CaCO}_3} = 127.193 \frac{\text{granos}}{\text{gal}}$$

Según el factor de compensación se obtiene:

$$D = 127.193 \frac{\text{granos}}{\text{gal}} * 1.5 = 190.789 \frac{\text{granos}}{\text{gal}}$$

Ahora la capacidad total operativa de la resina expresada en términos de granos/ es:

⁷⁹ CAPITULO 3. Intercambio iónico. Modo de operación. p 14-16[En línea]<<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf> > [citado el 15 de mayo del 2019]

$$C_{op} = 1.3 \frac{eq}{l} = \frac{1000meq}{1eq} * \frac{50ppm \text{ de } CaCO_3}{1 \frac{meq \text{ } CaCO_3}{l}} * \frac{1 \frac{granos}{gal}}{17.1ppm \text{ de } CaCO_3} * \frac{1gal}{3.78541 l}$$

$$C_{op} = 1004.163 \frac{granos}{l}$$

Determinado eso, se efectúa la nueva capacidad operativa máxima que tendrá la resina, partiendo del volumen de resina a utilizar expresada en cálculos anteriores:

Ecuación 17. Capacidad operativa máxima

$$C_{opm} = C_{op} * V_R$$

Fuente: ECNOLOGÍA AQUÁTICA. Pasos para elegir equipo de tratamiento de agua residual y commercial ligero Cálculo de capacidad para filtros y suavizadores. [En línea] <<http://www.aquatica.com.mx/tratamiento2/>> [citado el 15 de mayo del 2019]

$$C_{opm} = 1004.163 \frac{granos}{l} * 17 l = 17070.775 \text{ granos}$$

Donde:

Du : Dureza

C_{op} : Capacidad total operativa de la resina

C_{opm} : Capacidad operativa máxima

V_R : Volumen de resina utilizada

Establecido esto, es posible calcular el volumen del agua utilizada entre regeneraciones para depurar cualquier traza de regenerante y contaminante estancado en la resina durante los lavados. Con ello, alcanzamos tiempo estimado entre regeneraciones o de la misma manera, el tiempo en que la resina deja de ejecutar su trabajo de intercambio (inactivación):

Ecuación 18. Volumen de agua entre regeneraciones

$$V_{Agua} = \frac{C_{opm}}{D}$$

Fuente: ARAGÒN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 198 p.

$$V_{Agua} = \frac{17070.775 \text{ granos}}{190.789 \frac{\text{granos}}{\text{gal}}} = 89.474 \text{ gal}$$

Ecuación 19. Tiempo entre regeneraciones

$$t_{Ereg} = \frac{V_{Agua}}{Q}$$

Fuente: ARAGÒN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 199 p.

$$t_{Ereg} = \frac{89.474 \text{ gal}}{396.258 \frac{\text{gal}}{\text{dia}}} = 0.2258 \text{ dia} = 5.42 \text{ h}$$

Donde:

D : Dureza del agua bruta

C_{op} : Capacidad operativa de la resina

C_{opp} : Capacidad operativa de la resina en el proceso

V_R : Volumen de la resina en el proceso

V_{Agua} : Volumen de agua utilizada en las regeneraciones

t_{Ereg} : Tiempo entre regeneraciones

A partir de la **Ecuación 19** se concluye que la operación de intercambio iónico tiene un ciclo de operación de servicio de 5.42 horas, en los cuales se procesa el flujo actual de la mina, y una vez cumplido este tiempo, el flujo a través de esta columna se detiene y se procede a las siguientes etapas, mientras que la columna que estaba sin operar inicia el ciclo.

Tabla 25. Parámetros en la Etapa de carga

Parámetro	Símbolo	Magnitud
Velocidad del agua a la entrada del reactor (m/h)	v	3.5371
Caudal del agua en el tratamiento (m ³ /h)	Q	0.0625
Capacidad operativa de la resina (granos/l)	C _{op}	1004.163
Capacidad operativa de la resina en el proceso (granos)	C _{opp}	17,070.775
Volumen de la resina en el proceso (L)	V _R	17
Volumen de agua utilizada en las regeneraciones (gal)	V _{Agua}	89.474
Tiempo entre regeneraciones (h)	t _{Ereg}	5.42

Fuente: elaboración propia

Las observaciones o recomendaciones para esta operación para la eficacia de este proceso en las condiciones actuales la Mina son:

- Tanto la columna 1 como la columna 2 poseen un único punto de salida del efluente, el cual se dispone para su traslado a la siguiente operación (Neutralización con cal) o almacenamiento en humedales artificiales, el cual es un proyecto propuesto por la alcaldía del Municipio que no es de énfasis en este trabajo de grado.
- Los accesorios del diseño de las columnas son regulados y controlados manualmente por el operario encargado de la planta de tratamiento de la mina, quien está a cargo también de la preparación de la solución regenerante.
- El sistema se detendrá solo cuando sea necesario un mantenimiento de equipo o cuando las resinas cumplan su vida útil
- La columna está diseñada para disminuir el parámetro de conductividad y con ello la cantidad de iones sulfatos presentes y no se controla otra propiedad fisicoquímica.

4.2.2 Etapa de lavado . Etapa que utiliza un flujo ascendente de agua limpia, para la eliminación de los posibles finos y restos de partículas que se acumulan en el lecho de resina durante la fase de operación, y para favorecer una reclasificación del material del lecho, evitando la formación de canales preferenciales⁸⁰. Esta etapa tiene un tiempo de duración de aproximadamente 5 minutos, tiempo que fue recomendado por el proveedor y la velocidad de lavado utilizada es obtenida de la ficha técnica de la resina (**ANEXO H**), la cual debe ser de 5 m/h, por lo tanto, para la columna montada, se optará por realizarla a la velocidad especificada para prevenir cualquier tipo de problema operacional en el proceso.

4.2.3 Etapa de regeneración. Es la etapa en donde las resinas al reducirse su capacidad de intercambio se ponen en contacto con la solución regeneradora, hidróxido de sodio (NaOH), con el fin de restaurar su forma iónica original. Esta etapa es importante en el proceso de intercambio iónico ya que el buen funcionamiento de la resina en sucesivos procesos de carga depende de una regeneración eficiente. Para obtener un buen rendimiento en la regeneración es de importancia calcular parámetros como la concentración y volumen de disolución regenerante, así como la velocidad de flujo:

4.2.3.1 Cantidad de regenerante. Este es especificado por el proveedor en la guía (ANEXO H) en una proporción de 50 a 80 gramos de hidróxido de sodio (NaOH) por cada litro de resina. Dada la experiencia para este tipo de resina la cantidad de 50 gramos alcanza las proporciones requeridas por lo que se necesitaran para 17 litros de resina una cantidad de 850 g del regenerante⁸¹ al 99% en pureza.

$$masa NaOH = 850 g$$

⁸⁰ INDITEX. Ficha técnica de etapas de proceso de planta de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Intercambio iónico. p 1-30[En línea]<
<https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Intercambio+iónico.pdf/a832c542-7c3a-4d31-789b-5f318eced659> > [citado el 25 de mayo del 2019]

⁸¹ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 195-196 p.

Ecuación 20. Volumen de regenerante

$$V_{NaOH} = \frac{m_{NaOH}}{\rho_{NaOH}}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 196 p.

Donde:

V_{NaOH} : Volumen de NaOH

m_{NaOH} : Masa de NaOH

ρ_{NaOH} : Densidad de NaOH

$$V_{NaOH} = \frac{850 \text{ g}}{1.511 \frac{\text{g}}{\text{ml}}}$$
$$V_{NaOH} = 562.54 \text{ ml} = 0.00056254 \text{ m}^3$$

Sin embargo, esta cantidad de hidróxido de sodio (NaOH) debe estar disuelto en agua para obtener la solución regenerante, por ello se toma de la ficha técnica de la resina Lewatiti Monoplus MP 68 (**ANEXO H**) suministrada por el proveedor, un porcentaje en peso del NaOH de 2% – 4%, el cual permite obtener la cantidad de agua requerida para diluir el hidróxido de sodio a partir de la siguiente fórmula:

$$\% W NaOH = 3\% \text{ de } NaOH$$

Ecuación 21. Masa de agua para solución regenerante

$$m_{H_2O} = \frac{m_{NaOH}}{\frac{\% W_{NaOH}}{100\%}} - m_{NaOH}$$

$$m_{H_2O} = \frac{850 \text{ g}}{\frac{3\%}{100\%}} - 850 \text{ g}$$

$$m_{H_2O} = 27,483.33 \text{ g de } H_2O$$

Donde:

m_{NaOH} : Masa de NaOH

m_{H_2O} : Masa de H₂O

$\%W_{NaOH}$: Porcentaje en peso de NaOH

Con la masa del agua requerida y la densidad del agua a condiciones normales se puede obtener el volumen de agua que se necesita para obtener la solución regenerante:

Ecuación 22. Volumen de agua para dilución de NaOH

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}$$

$$V_{H_2O} = \frac{27.48333 \text{ kg}}{1,000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V_{H_2O} = 0.02748 \text{ m}^3 \text{ de agua}$$

Esta cantidad de agua es necesaria para diluir los 850 g de NaOH requerido para la solución regenerante del proceso.

4.2.3.2 Velocidad y tiempo de regeneración. Se determina estas propiedades con fin de proporcionar a la empresa, un caudal óptimo de regeneración que servirá en la activación de la propuesta de intercambio durante tal proceso y a la vez la determinación del tiempo mínimo de regeneración en el que debe presentar contacto la resina con el agente regenerante (no se presentaran afectaciones si se supera este tiempo mínimo):

Ecuación 23. Velocidad de regeneración

$$v_{reg} = \frac{Q_{reg}}{A_{Resina}}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 197 p.

$$Q_{reg} = 0.01767m^2 * 5 \frac{m}{h}$$

$$Q_{reg} = 0.0884 \frac{m^3}{h}$$

Dando así:

Ecuación 24. Tiempo de regeneración

$$t_{reg} = \frac{V_{Regenerante}}{Q_{reg}}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 193 p.

Teniendo en cuenta que el Volumen de regenerante es la sumatoria del volumen de agua y el volumen de hidróxido de sodio (NaOH), calculados anteriormente, debido a que estas dos sustancias forman la solución de regeneración para la resina:

$$t_{reg} = \frac{0.02804254 m^3}{0.0884 \frac{m^3}{h}} = 0.3172 h = 19.033 min$$

Donde:

T_{reg} : Tiempo que gasta la resina en regenerarse

Q_{reg} : Caudal de regeneración

V_{reg} : Velocidad de regeneración

V_{NaOH} : Volumen de regenerante a utilizar

ρ_{NaOH} : Densidad del regenerante a utilizar

m_{NaOH} : Masa del regenerante a utilizar

Tabla 26. Parámetros en la Etapa de regeneración

Parámetro	Símbolo	Magnitud
Tiempo que gasta la resina en regenerarse (min)	T_{reg}	19.033
Caudal de regeneración (m ³ /h)	Q_{reg}	0.0884
Velocidad de regeneración (m/h)	V_{reg}	5
Masa del regenerante a utilizar (g)	m_{NaOH}	850
Volumen de agua de dilución (m ³)	ρ_{NaOH}	0.02748
Tiempo entre regeneraciones (h)	t_{Ereg}	5.42

Fuente: elaboración propia

Como recomendaciones para el proceso de regeneración y garantizar una adecuada operación se tiene:

- Usar agua limpia para la preparación de la solución con NaOH con el fin de evitar cualquier tipo de contaminación a la solución y posteriormente a la resina.
- Se debe agitar la solución regenerante para obtener una solución homogénea para evitar malas eficiencias en el proceso.
- Cumplir con los tiempos, caudales y volumen de regenerante a utilizar, ya que esto conllevaría a una deficiencia en el proceso de INI.

4.2.4 Etapa de enjuague

Es la etapa seguida a la regeneración, ya que es necesario retirar el exceso de solución regenerante que haya podido quedar retenida en los poros de las partículas de resina Lewatiti y en los intersticios del lecho. El proceso de enjuague se realiza con un volumen de agua representado en cuatro veces la cantidad de lecho de resina utilizado en la columna, por tanto:

Ecuación 25. Volumen de agua de enjuague

$$\mathbf{Volumen\ de\ agua\ de\ enjuague = 4 \times V_R}$$

Fuente: proporcionada por la empresa Biocidas y Químicos S.A.S

$$Volumen\ de\ agua\ de\ enjuague = 4 \times 17\ litros = 68\ litros = 0.068\ m^3$$

Este proceso según la literatura se tiene que efectuar en dos etapas secuenciales que van a ser adoptados en el proceso:

- Enjuague lento: Enjuague a baja velocidad en donde se eliminan los productos remanentes de la solución regenerante, utilizando el 75% del volumen total de agua necesaria para este proceso, calculado a partir de la **Ecuación 25**.
- Enjuague rápido: Realiza una limpieza de los productos incrustados en la columna y un ordenamiento del lecho, utiliza el 25% de volumen total del agua necesaria para este proceso, calculado a partir de la **Ecuación 25**.

Al igual que para la etapa de lavado y regeneración, esta etapa se efectúa a una velocidad de 5 m/h, dando como resultado un caudal para esta operación de 0,0884 m³/h, por lo tanto, el tiempo para el proceso de enjuague es calculado a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 26. Tiempo de enjuague

$$t_{enjuague} = \frac{V_{Enjuague}}{Q}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 75 p.

$$t_{enjuague} = \frac{0.068 \text{ m}^3}{0.0884 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

$$t_{enjuague} = 0.7692 \text{ h} = 46.154 \text{ min}$$

Tabla 27. Parámetros en la Etapa de enjuague

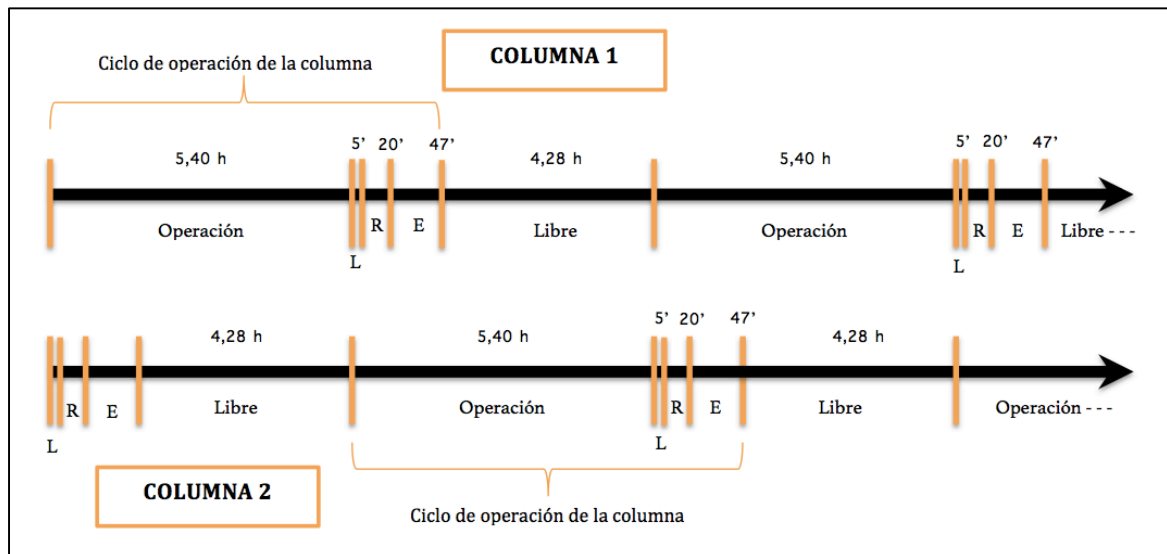
Parámetro	Símbolo	Magnitud
Volumen total de enjuague (m ³)	V_{En}	0.068
Volumen en enjuague lento (m ³)	V_{EL}	0.051
Volumen en enjuague rápido (m ³)	V_{ER}	0.017
Tiempo total de enjuague (min)	T_{En}	46.154

Fuente: elaboración propia

Se recomienda que parte del agua usada para este proceso provenga del agua obtenida de la operación o de fuentes poco contaminadas, debido a que esta no puede contener iones de sulfatos que saturan a la resina, por tanto, parte del agua que salga del proceso de INI tiene que ser desviada a la columna que está terminando su ciclo.

4.3 TIEMPOS DE PROCESO PARA LA SINCRONIZACIÓN DE LAS COLUMNAS

Ilustración 34. Tiempos de proceso de las CII



Fuente: Elaboración propia

L: Lavado; R: Regeneración; E: Enjuague

En la **Ilustración 34** se evidencian los tiempos necesarios para las etapas de carga, lavado, regeneración y enjuague que corresponden al ciclo total de la columna de intercambio, con el fin de visualizar de una manera global el proceso de las columnas alternantes planteadas en el proyecto de grado. Es necesario aclarar que, según los cálculos obtenidos en el escalonamiento realizado, la columna se encuentra en operación aproximadamente 5 horas y 42 minutos antes de llegar a su punto de saturación, y que una vez cumplido ese tiempo la segunda columna debe estar realizando el proceso necesario para tener la resina en las condiciones adecuadas para iniciar un nuevo ciclo.

El ciclo de operación de cada columna es de aproximadamente 7 horas, en donde las resinas ubicadas en la parte interna de la columna pasan por las etapas de carga, lavado, regeneración y enjuague, para finalizar en un tiempo libre de operación de 4 horas y 28 minutos hasta que la otra columna del sistema termine su operación.

4.4 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD Y PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO

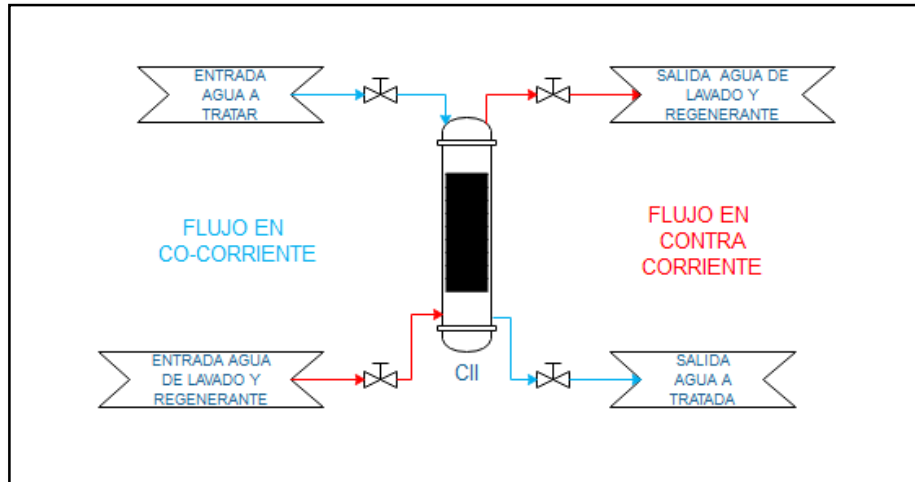
Estas columnas están diseñadas en PVC (Policloruro de Vinilo) debido a que son materiales inertes y se caracterizan por su alta resistencia a la corrosión, a los ataques químicos debido a soluciones salinas, ácidos y álcalis fuertes⁸², además por ser de un material liso no proporcionan pérdidas por fricción altas, son ligeras en peso, de bajo costo de instalación y fácil mantenimiento.

Las CII deben poseer en la entrada y en la salida unas válvulas de bola PVC $\frac{3}{4}$ manuales que permitan la entrada de la corriente al proceso y la salida del efluente después del tiempo de retención que se requiere para llegar a una conductividad inferior a 1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y poder ser reutilizada en la agricultura, siendo este tiempo de retención aproximadamente de 15 a 20 minutos según la experimentación realizada. Para la entrada del efluente al proceso se tiene que proveer de una bomba electro sumergible ubicada en el tanque de adsorción con arcilla y un adaptador macho de 2 válvulas que direcciona el flujo del agua a la columna que va a realizar el proceso de intercambio, el cual consiste en someter al agua residual de la mina a un contacto directo con el lecho de la resina LEWATITI MonoPlus MP68, intercambiando los iones hidroxilo por los iones sulfato u otros ácidos fuertes presentes en el agua ocasionando una disminución en la conductividad y dureza del recurso.

La operación se realiza en co-corriente haciendo uso de la gravedad como mecanismo de contacto del efluente con la resina a expensas de los requerimientos de la Mina y se realiza aproximadamente durante 5 horas y 40 minutos, el cual es el tiempo de procesamiento del flujo de agua calculado anteriormente, una vez cumplido este tiempo, no ingresa más corriente de agua sobre dicha columna (Columna 1), debido a que a ese punto la resina dentro de esta se ha saturado y debe iniciar el proceso de lavado, regeneración y enjuague descritos anteriormente y la columna alterna (Columna 2) empieza su ciclo de operación.

⁸²LIMPIEZATUBERIAS. Tuberías PVC [En línea]<<http://www.limpiezadetuberiascostarica.com/>> [citado el 26 de mayo del 2019].

Ilustración 35. Esquema de entrada y carga de regenerante

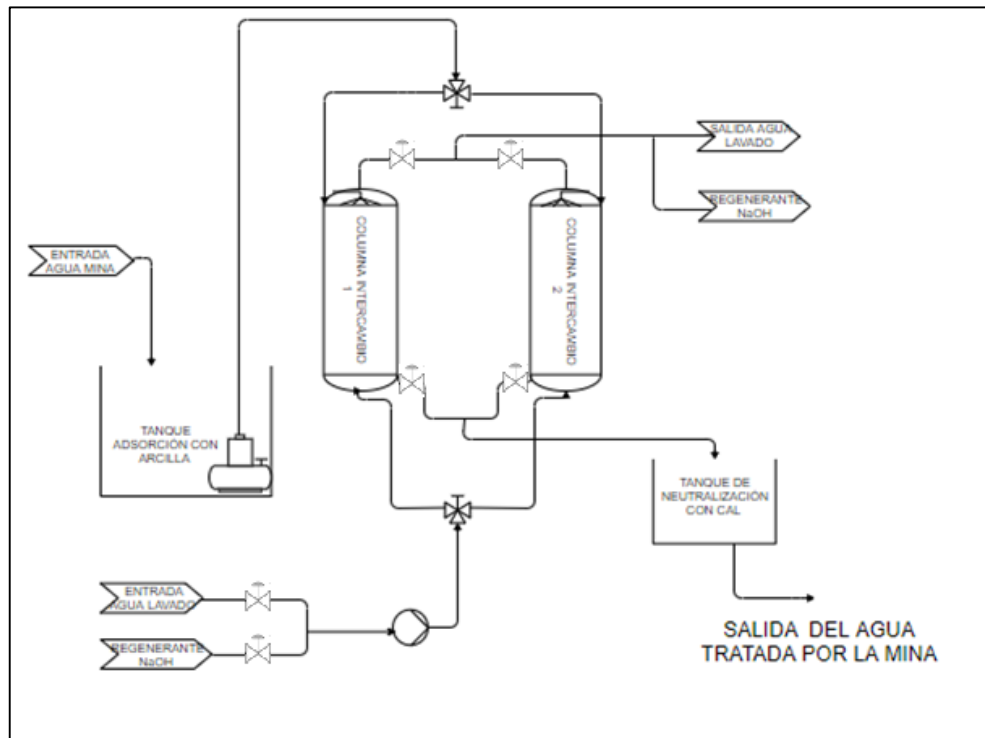


Fuente: CAPITULO 3. Intercambio iónico. Modo de operación. p 14-16 [Enlínea]<<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf> >[citado el 25 de mayo del 2019]

Adicionalmente el diseño contiene un tanque de preparación de la solución regenerante (Solución de NaOH), que mediante un sistema dotado con una válvula de bola PVC $\frac{3}{4}$, electrobomba centrífuga $\frac{3}{4}$ HP y un adaptador macho de 2/válvulas permite el flujo y direccionamiento de la solución en la entrada a la columna de intercambio que este en el proceso de regeneración o del agua de lavado y enjuague, según la etapa del proceso. Estas operaciones se realizan a contracorriente y en un tiempo total aproximado de 1 hora según lo establecido anteriormente, obteniendo por la parte superior de la columna agua de lavado y solución regenerante restante de estas 3 etapas de proceso, efluentes que son almacenados en un tanque séptico. Una vez realizado estas etapas, la columna 1 queda en reposo hasta que la otra (Columna 2) se sature, comenzando un nuevo ciclo de operación.

El diseño propuesto posee puntos de acceso hacia el interior de la columna en su parte superior e inferior para permitir el mantenimiento de la columna cuando se requiera y el cambio de la resina cuando culmine su ciclo de vida, sin embargo, estos puntos de acceso están fuertemente sellados durante toda la operación de INI impidiendo que se generen pérdidas de fluidos. Cabe aclarar que esta operación debe ser controlada manualmente por los operarios, debido a que el diseño se adapta al tratamiento artesanal hasta ahora manejado por Mina 2 LTDA.

Ilustración 36. Unidad de INI escalado



Fuente: elaboración propia

En la **Ilustración 36** se puede evidenciar el diseño descrito en esta sección realizado un software en línea especializado en diagramas de tuberías e instrumentación denominado VisualParadigm.

4.5 MANTENIMIENTO DEL EQUIPO SUAVIZADOR Y OTRAS RECOMENDACIONES

Es necesario un buen mantenimiento del sistema diseñado con columnas de intercambio iónico para el desarrollo y preservación del equipo y el futuro del proceso durante todos sus ciclos de operación. El mantenimiento adecuado de las columnas proporciona un fácil manejo y control del proceso, por ende, es de importancia tener en cuenta las recomendaciones presentadas en este apartado para garantizar la conservación de las características de las columnas dentro del rango de su vida útil. Es necesario que se verifique semanalmente cada uno de los acoples u accesorios del sistema de intercambio como lo son válvulas, bombas y adaptadores con el fin de asegurar su buen funcionamiento durante la operación, además que se haga una revisión del estado externo de la columna para regular el deterioro de la pintura y las mangueras que permiten el flujo de las corrientes de agua y regenerante en la entrada y salida de las columnas.

Durante las etapas del proceso se debe prestar atención y control sobre la salida del efluente, con el fin de verificar que en la corriente no haya alta presencia de

partículas de resina, en dado caso, que se presente alto contenido de resina progresivamente en esta corriente es necesario hacer uso de filtros que eliminen esta cantidad en el efluente debido a que imposibilita el uso del efluente para riego de cultivos, es necesario también que haya un control sobre el pH de la corriente de salida de la columna, ya que como se observó en la experimentación, este parámetro incremento gradualmente con los tiempos de retención en la columna, y es de importancia que no sobrepase el límite establecido en la norma de riego del país. Además, se debe verificar la calidad del agua que se va a utilizar en los procesos de lavado y enjuague, para que no haya una contaminación en la resina y una ineficiencia en el proceso de intercambio.

Es necesario que se tenga un estricto control en la preparación de la solución regenerante ya que una mala preparación y agitación conllevaría a una mala regeneración y una pérdida en la capacidad de intercambio como fue demostrado en la experimentación, por ello es necesario prestar atención a los volúmenes de NaOH y agua usados en la solución, que sean los establecidos en el escalonamiento realizado del presente proyecto, para obtener una mezcla homogénea y sin trazas que puedan causar incrustamientos en el sistema de mangueras.

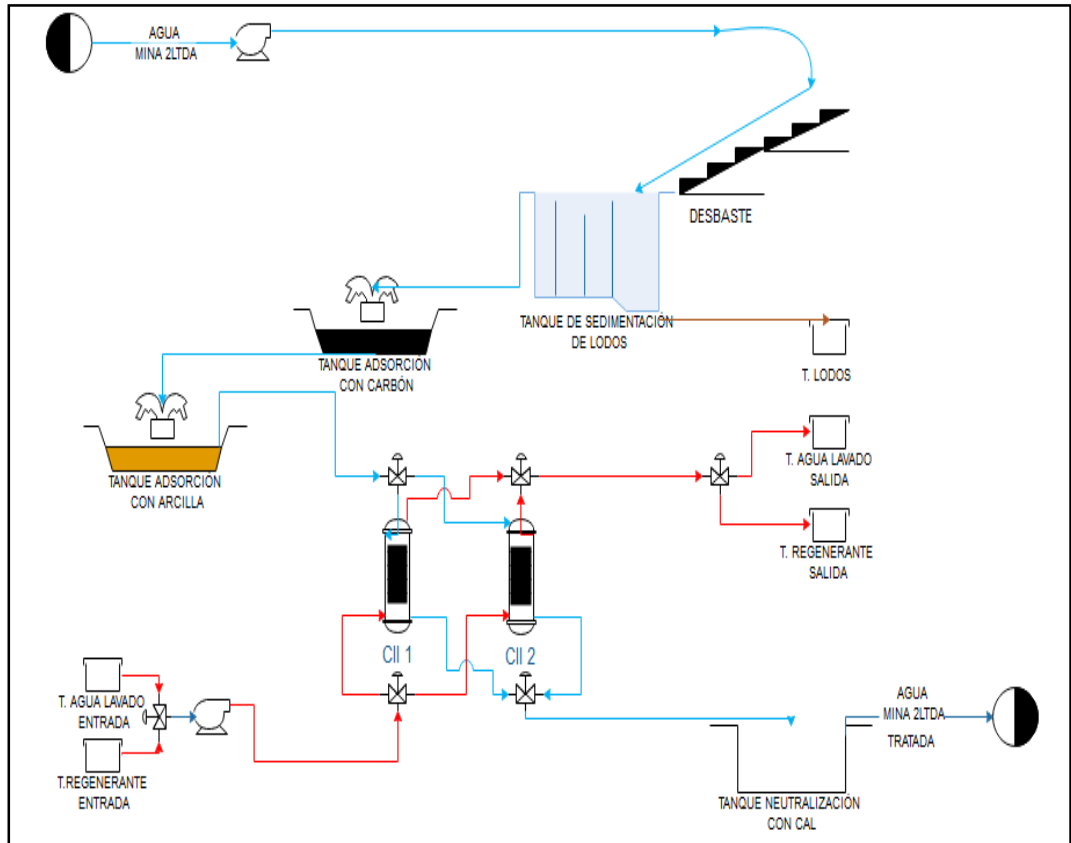
Tener en cuenta que al aproximarse al tiempo de vida útil de la resina (aproximadamente 5 a 10 años, el cual es el tiempo esperado según por el proveedor) se deben aumentar los controles en la corriente de salida de la columna, ya que puede suceder que la resina pierda su capacidad de regenerarse antes del tiempo límite y por tanto se debe proceder de inmediato al cambio de la resina en el interior de la columna, sin embargo hay que tener en cuenta que la vida útil de la resina está controlado por la calidad del agua a tratar, entonces es necesario que es evalué su capacidad de intercambio anualmente o cada dos años, para evitar ineficacia en el proceso.

4.6 UBICACIÓN EN PLANTA

Es necesario que la instalación de la CII sea en una zona cubierta para evitar el desgaste externo a causa de la contaminación ambiental (lluvia o excesivo sol) que pueda ocurrir durante todos los ciclos de operación de su vida útil y en un espacio libre de obstáculos para facilitar su operación manual y su control. Se recomienda que la separación entre las columnas no sobrepase los 0.5 metros y que el tanque de solución de soda cáustica se ubique cercano al sistema de INI para la supervisión de la operación y no incurrir en costos de transporte de los fluidos. Para objetos del proyecto se evidencia en la siguiente imagen el proceso global del tratamiento convencional implementado en la mina actualmente junto con la ubicación propuesta de la CII con las dimensiones estipuladas en la **Tabla 25**, en donde se está considerando el estado actual de manejo del agua residual en la planta de tratamiento de Mina 2 LTDA.

En la **Ilustración 37** se evidencia el proceso global de tratamiento de Mina 2 LTDA, junto con la alternativa propuesta en el presente proyecto de grado, en donde se adiciona un proceso de INI posterior al procedimiento de adsorción con arcilla manejado actualmente en el tratamiento convencional del agua residual de la mina, seguido de la neutralización con cal para su disposición final y reutilización en la agricultura.

Ilustración 37. Ubicación en planta del proceso de INI



Fuente: Elaboración propia

5. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

Planteada la propuesta y luego de su experimentación a escala piloto y no laboratorio, se determinó que la viabilidad de la puesta en marcha de este proyecto sin tecnificación alguna fue efectiva, por lo que se emplea un estudio de prefactibilidad donde se propone un diseño con materiales y servicios de gran facilidad de adquisición, en el que se analizó un costo-beneficio partiendo de la instrumentación necesaria para su construcción dependiendo de las especificaciones técnicas determinadas en el capítulo anterior, y en comparación con los costos, junto con el valor industrial del metro cubico de agua tratada que cuesta implementar este INI y por ende verificar si se incrementarían o no los costes en el tratamiento y de la misma manera, el rechazo o aceptación de este proyecto.

5.2 IDENTIFICACIÓN DE COSTOS

5.2.1 Costos de inversión. Estos costos corresponden a los elementos necesarios para la realización del montaje en la planta de tratamiento de la sociedad minera. Los precios de los accesorios y materiales fueron tomados en la página de ventas de Homecenter Colombia⁸³.

Tabla 28. Costos de inversión

COSTOS DE INVERSIÓN	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
Tubo PVC/metro	4	\$4,150.00	\$16,600.00
Adaptador macho 2/válvulas	2	\$94,900.00	\$189,800.00
Manguera ¾ pulgadas/metro	4	\$7,900.00	\$31,600.00
Válvula de bola PVC	6	\$9,500.00	\$57,000.00
Bomba sumergible	1	\$89,900.00	\$89,900.00

Fuente: elaboración propia

⁸³ Tomado de la página principal de servicio al cliente y ventas de Homecenter Colombia. Disponible en: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/>

Tabla 29. (Continuación)

COSTOS DE INVERSIÓN	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
3 vías conector Metal latón manguera	2	\$6,000.0	\$12,000.00
Electrobomba centrifuga	1	\$299,900.00	\$299,900.00
TOTAL		\$696,800.00	

Fuente: elaboración propia

5.2.2 Costos de insumos. Dado que no se necesita ningún solvente o químico adicional para este tratamiento, solo se contarán en los costos de insumos, la proporción de regenerante que se utilizara en el tratamiento por todo el año para la regeneración y activación de la resina, igualmente se tomará el valor de la cantidad de resina validando las dos torres continuas, sabiendo de la misma manera que su vida útil es de un año, por lo que no se necesitara adquirir más por el año de uso en el tratamiento del agua residual.

Tabla 30. Costos de insumos

	CANTIDAD/AÑO	PRECIO/	PRECIO TOTAL /AÑO
RII (L)	34	\$39,200.00+ IVA (19%)	\$1'586,032.00
Hidróxido de sodio NaOH(kg)	255	\$5,000.00	\$1'275,000.00

Fuente: elaboración propia

5.2.3 Costos de energía eléctrica. Presentado los insumos necesarios para la estructuración de este nuevo tratamiento, se presenta la necesidad de adquirir una bomba sumergible con capacidad máxima de 510 litros por hora (mayor que el caudal de trabajo en la planta de tratamiento) y un consumo de 20W, y una electrobomba de 746W, lo que hace un gasto de energía adicional en el proceso. Con ayuda de los datos estadísticos de la Empresa de Energía de Boyacá S.A. E.S.P. para el año 2019⁸⁴ y en el sector de operación donde se plantea ubicar la planta piloto propuesta, el costo del de la energía es de \$561.97 COP/kWh. Con ello se termina el costo anual de energía por la adición de este objeto:

Tabla 31. Costos de energía eléctrica

	CANTIDAD (Kwh/Día)	COSTO DE ENERGÍA (COP/Kwh)	COSTO TOTAL DE ENERGÍA COP/Día
Consumo Bomba	0.16	\$561.97	\$89.92
	5.968	\$561.97	\$3353.83
Costo total de energía COP/año		\$1'033,127.09	

Fuente: elaboración propia

5.2.4 Costos de mantenimiento. Ya que el sistema de INI incluye la presencia de dos bombas para para dar ingreso al agua a tratar y las corrientes de lavado y regenerado, estas presentan contaste uso por lo que se estipula unos mantenimientos para su buen funcionamiento dada las características de la bomba:

Tabla 32. Costos de mantenimiento

	CANTIDAD	COSTO MANTENIMIENTO COP/año
Mantenimiento de bombas	1	\$40,000.00

Fuente: elaboración propia

⁸⁴ Tarifas de energía en el departamento de Boyacá en las provincias Norte y Gutiérrez para el año 2019. Disponible en: <https://www.ebsa.com.co/nuestra-empresa.html>

5.2.5 Costo metro cubico de agua tratada. A partir de la totalidad de los costos anteriormente mencionados, estos suman un valor (COP) de \$4´630,959.09 que, en conjunto con el caudal del agua de la mina de carbón, se estima el costo por metro cubico del agua tratada al año (12 meses) por este proceso de intercambio:

Tabla 33. Costo m³ de agua tratada

	TOTAL, COSTOS (COP)	CAUDAL Q (m³/año)
	\$4´630,959.09	450
Costo (COP \$/m³)	\$10,291.02	

Fuente: elaboración propia

Es importante destacar, que este valor es estimado para verificar costos adicionales a la hora de la implementación de tratamientos alternos o nuevos tratamiento. Para el caso de esta empresa, la inversión para la estructuración de esta propuesta no representa una cantidad como para emprender una búsqueda de un posible financiamiento, ya que por sus ingresos por la venta del carbón (naturalidad de la empresa), esta no representa un gasto notorio para su puesta en marcha. Es por ello que el análisis costo beneficio, abarca un flujo de caja en base de lo que cuesta industrialmente el m³ al implementar estas columnas de intercambio, con el costo del m³ del agua tratada por la empresa.

5.3 IDENTIFICACIÓN DE BENEFICIOS

Frente al desarrollo de la mejora del tratamiento de agua de la mina, el beneficio principal parte de un análisis de la propuesta trabajada industrialmente verificando hasta el día de hoy, el costo total que llevaría tratar el afluente cada m³ saliente respecto al costo que se da con la alternativa. Dado esto se presenta la identificación de los beneficios y la viabilidad del proyecto.

5.4 FLUJO DE CAJA

Dada la economía frente a los costos de estructuración de la propuesta, no se tendrá ninguna financiación, por ello es que se realiza una comparación entre un valor promedio del costo total por m³ de agua tratada industrialmente(5.5 peso mexicano/ m³ al mes)⁸⁵ al año con el metro cubico del agua tratada que se plantea en este proyecto, donde si se presenta un flujo de caja negativo se verían incrementados los costos de tratamiento, pero de lo contrario, si se obtiene un valor positivo se vería un reducción en los costos y el proyecto sería factible:

Ecuación 27. Flujo de caja

⁸⁵ Tomado en “secretaria de medio ambiente y recursos naturales” para el costo por m³ de agua tratada con resinas de intercambio iónico. Disponible en: <http://cenca.imta.mx/pdf/43978Pri.pdf> 74p

$$\text{flujo de caja: } \frac{\$COP}{m^3 \text{ind}} - \frac{\$COP}{m^3 \text{propuesta}}$$

$$\text{flujo de caja} = 11,703.36 \frac{\$COP}{m^3} - 10,291.02 \frac{\$COP}{m^3}$$

$$\text{flujo de caja} = 1,412.34 \frac{\$COP}{m^3}$$

Como el valor es mayor a 0, eso quiere decir que para esta propuesta los costos dentro del tratamiento no se verán afectados a un incremento.

5.5 CÁLCULO DE RELACIÓN BENEFICIO/COSTO

El análisis costo beneficio propone una relación entre valor actual de los ingresos totales o beneficios netos (VAI), provenientes del flujo de caja previamente establecido, y el valor actual de los costos totales (VAC) frente al proyecto propuesto en el documento. Para su análisis se tiene presente las siguientes relaciones:

Ecuación 30. Relación beneficio/costo

$$\frac{B}{C} = \frac{VAI}{VAC}$$

$$\frac{B}{C} < 0; \text{ el proyecto no es rentable, se rechaza.}$$

$$\frac{B}{C} \geq 0; \text{ el proyecto es rentable, se aplica.}$$

$$\frac{B}{C} = \frac{1,412.34}{10,291.02} = 0.14$$

Esto resume que el proyecto es aceptable para la mejorar la calidad del agua con el objetivo principal de darle un uso en temas agrícolas. De la misma manera este proyecto beneficiará al campesinado “San matense” en cercanías a la sociedad minera ya que Mina 2 Ltda., busca proveer a esta población sin la necesidad de recibir un cambio monetario por el recurso. Con ello la población dejara de pagar \$600 COP/m³ ⁸⁶ mensuales que les vale el agua en esa zona veredal y, por ende, dar uso al agua tratada por la mina.

⁸⁶ Dato proporcionado por el secretario de planeación del municipio de San Mateo.

6. CONCLUSIONES

- Se diagnosticó el estado del agua tratada mediante un análisis fisicoquímico, ésta cumple con los parámetros de vertimiento dada la efectividad de su planta de tratamiento, sin embargo, no presenta una calidad adecuada para su reúso en aplicaciones agrícolas por su alto contenido de sales que incrementan el parámetro de conductividad a 4350 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y por ende, presenta sulfatos que infieren en este mismo criterio, afectando directamente el crecimiento de los cultivos.
- Se realizó un análisis comparativo los tratamientos existente mediante una matriz de selección puhg, obteniendo que las resinas de intercambio iónico como tratamiento terciario son una alternativa debido a la facilidad de operación, al bajo costo de implementación y por su aplicabilidad para la disminución de los parámetros previstos del análisis fisicoquímico que impiden la reutilización del agua residual de Mina 2 LTDA en la agricultura, siendo de utilidad las resinas aniónicas por su selectividad hacia los ácidos fuertes, como los sulfatos que tienen una gran influencia en la conductividad de este tipo de aguas.
- Se diseñó una columna de intercambio iónico, para evaluar la efectividad del tratamiento, en esta se redujo la conductividad a 1408 $\mu\text{s}/\text{cm}$, menor al límite que exige la normativa para su posterior utilización en sistemas de riego. No obstante, al existir una relación proporcional directa entra la conductividad y los sulfatos, se esperaría que estos últimos presentaran una disminución.
- Dada la efectividad de la experimentación a escala piloto de la propuesta formulada, se prosiguió con el escalonamiento del proceso de INI involucrando variables propias de la mina como el caudal de 1,5 $\text{m}^3/\text{día}$ de AR, especificando las etapas de carga, lavado, regeneración y enjuague que se deben manejar para el buen funcionamiento del proceso, evidenciando un tiempo de ciclo de operación de la CII de 6 horas y 50 minutos, un mantenimiento constante y la ubicación propuesta de la alternativa en la mina, para cumplir con los requerimientos de reutilización en la agricultura.
- Frente a los costos para la estructuración y puesta en marcha del proceso, no fue necesario un financiamiento debido a la economía frente a su construcción. Por ende, se realizó un análisis costo beneficio, donde se dimensionó el costo total al año que le cuesta a la empresa emprender este tratamiento por cada m^3 de agua tratada en comparación, con el costo teórico industrial del m^3 tratado por este tipo de resinas de intercambio, con lo que resultó que no se presentaran aumentos en el costo del tratamiento y se beneficiara la empresa con la implementación de este proyecto, que deriva en realidad a un beneficio social con el campesinado del sector rural del municipio.

7. RECOMENDACIONES

- Verificar el estado de los tanques aledaños ya instalados en la planta para evaluar la viabilidad de habilitarlos para la preparación y almacenamiento de la solución regenerante, en dado caso de ser ineficientes para la aplicación, diseñar el tanque con una altura inferior a 1,5 metros para facilitar la preparación de la solución de hidróxido de sodio por parte del operario de la mina que evitará la necesidad de sistemas de carga mecánicos en esta etapa.
- Comparar técnica, operativa y financieramente el diseño planteado en la propuesta del presente proyecto de las dos columnas alternadas y el tanque de preparación de la solución frente a una alternativa manejada con un sistema en flujo co-corriente durante las etapas de regeneración, lavado y enjuague.
- Realizar la experimentación del proceso de INI seguido del proceso adsorción con arcilla para evaluar la variación del pH del efluente y así verificar si es necesario o no, la presencia del tanque de neutralización del proceso continuo ya que estas resinas, en su proceso de intercambio afectan directamente este parámetro dando una solución más básica como se presentó en el desarrollo experimental de este proyecto.
- Constatar por parte del operario encargado del proceso, que se presente una dilución completa del agente regenerante en los tanques previstos para estos, con la finalidad de suscitar un buen proceso de regeneración y no permitir incrustaciones que afecten los sitios activos de intercambio de las resinas.
- Proponer un sistema de carga y descarga en las columnas de intercambio iónico más funcional, que facilite el control por parte del encargado de la unidad.
- Llevar a cabo un estudio frente a la disposición final del agua utilizada en los procesos de lavado y enjuague, con la finalidad de posibilitar su reúso en el proceso.
- Indagar la posibilidad de aumentar el tiempo entre regeneraciones con el objetivo de disminuir costos en los agentes requeridos (agua de lavado y regenerante) del proceso de INI.

BIBLIOGRAFÍA

CATRO,Juliana.ZUÑIGA,Luis.ALVARADO,Darner. Conductivity as a predictive parameter ok hardness in groundwater and spring wáter of Costa Rica.(2017). *Tecnología en marcha. Vol 31-1*, Pag 35-46

CIRELLI, Angie.(2012). Water, an essential resource.*Química Viva.11(3)*.pp.147-170.

DEPARTAMENTO DE SANIDAD Y MEDIO AMBIENTE. Manual de tratamiento de aguas negras. México, Limusa, 2000.

DIAZ ARRÓNIZ, Sandra. Sistema automático para la determinación de la dureza del agua en descalcificadoras domésticos. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Politécnica de Cartagena España. Escuela técnica superior de Ingeniería Industrial 2018. 29-68 p.

ESPINOSA RODRIGUEZ, Miguel Angel. Diseño de una planta de tratamiento para el drenaje ácido de una mina en el estado de México. Tesis de maestría en ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería de Civil. 1997. 88 p.

GARCÍA, D. Efectos fisiológicos y compartimentación radicular en plantas de *Zea mays L*, expuestas a la toxicidad por plomo. Tesis doctoral en ciencias biológicas. Universidad Autónoma de Barcelona. 131 p.

GÓMEZ, Patricia. Criterios de selección para el tratamiento de las aguas residuales. Universidad Nacional abierta y a distancia - UNAD. Escuela de ciencias agrícolas, pecuarias y del medio ambiente. 2012.

HERRERA PEDREROS , Tatiana .Evaluación de los aireadores en la planta de tratamiento de agua potable “el cambio” que abastece a la ciudad de Machala, provincia de El Oro. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Civil.Unidad Académica de Ingeniería Civil de Machala , Ecuador . 2015. 20 p.

HUERTAS R., MARCOS C., IBARGUREN N., ORDAS S., Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Capítulo 5: 34p

INSTITUTO COLOMBIANO NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

JIMÉNEZ MORALES, Soledad. Estudio teórico para el control de la contaminación por grasas y aceites generada por la actividad industrial, doméstica y de servicios. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico Industrial. Instituto Politécnico Nacional de Ciudad de México, México . Facultad de Ingeniería . 2012. 4-11 p.

KEMMER, Frank N. y MCCALLION, John. Nalco Chemical Company. Usos del Agua en la agricultura. En: Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. 3 ed. México: Mc Graw Hill 1989. P. 42-5

LENNTECH. Información de producto. LEWATIT MonoPlus MP68. Edición Octubre del 2012. Disponible en: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Lewatit-MonoPlus-MP-68-SP-L.pdf>

LOZA, Nereyda., ADUVIRE, Osvaldo. Optimización de un proceso de tratamiento de aguas ácidas de mina para reducir contenidos de manganeso mediante neutralización secuencial. En: Tecnologías y ciencias del agua. vol. 8, no. 3 Jiutepec, May./Jun. 2017. 3 p.

MARTINEZ, Joelha. Tratamiento de aguas residuales e intercambio iónico [online]: issu, Marzo, 2012. [Citado marzo 12, 2019] Disponible en: <https://issuu.com/joeymartinez/docs/revistavirtual>

MIRANDA D., CARRANZA C., FISHER G. Calidad del agua de riego en la sabana de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, 2008. Capítulo 2: 15p

NEVÁREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba, Ecuador. 2009. 57 p.

POSADA, Fánor., POVEDA, Jeimy. La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*fragaria sp.* cv. Camarosa), 2005. [Citado marzo 12, 2019] Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v23n2/v23n2a13.pdf>

PUENTE, Ivan., POZO, José., LAGÜELA, Susana., VEIGA, María. Tratamiento microbiano de aguas ácidas resultantes de la actividad minera: una revisión. Instituto Mexicano de tecnología del agua, 2017.

RIGOLA LAPEÑA, Miguel. Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales. Barcelona. Marcombo Boixareu Editores. Capítulo III: Separaciones de sólidos y gases disueltos. 73 p.

RODRÍGUEZ V., TORRES A. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante arcillas naturales y modificadas. Monografía para optar el título profesional de: Especialista en Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Facultad de Ingeniería Físico-Química y Escuela de Ingeniería Química. 2009. 13, 29, 56 p.

RODRIGUEZ, A. LOPEZ, Y. RICO, L. CARRANZA, C. VALDES, B. Evaluation, modeling and optimization of fan ion Exchange column used in water treatment processes. (2015). *Afinidad LXXIII.(1).pp 210-218*

SANCHEZ F, Ana María. Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego. División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Chile Departamento de ingeniería Civil, 2005. Anexo A

SANCHEZ F, Ana María. Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego. División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Chile Departamento de ingeniería Civil, 2005.

SANCHEZ, Concepción. Ficha técnica de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Universidad Da Coruña. Septiembre de 2015. p 8.

SANCHEZ, Mario. DUARTE, Antonio. Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial. (2015). Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario. Universidad la Salle de Bogotá. 32-40 pp.

SCHOLLENBERGER, J. SIMON, R. *Determination of Exchange capacity and Exchange-able bases in soil-ammonium acetate method.*(2011). *Ohio Agricultural.59(1).pp.13-20*

SERVYECO. Tratamientos por resinas de intercambio iónico. Ingeniería y equipos. [Citado marzo 26, 2019] Disponible en: <https://www.servyeco.com/tratamientos-por-resinas-de-intercambio-ionico.html>.

TALAVERANO CARDENAS, Luis Felipe. Optimización del desempeño del pH en la precipitación de metales para incrementar la eficiencia del tratamiento de aguas ácidas con producción más limpia en la planta de procesos AWTP pampa larga. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, Perú. Facultad de Ingeniería Química y Textil. 2014. 21 p.

TEJADA, Candelaria., VILLABONA, Ángel., GARCÉS, Luz. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. En: *Tecnológica*, octubre, 2015, vol 8, no. 34.

ANEXOS

ANEXO B. ANÁLISIS FQ SEGÚN APLICACIÓN

Guía de Aplicaciones

Tabla 1 Guía de aplicaciones

	Agricultura	Acuicultura	Análisis de acuarios	Aguas para bebidas embotelladas	Aguas de calderas/refriamiento	Industrias químicas	Producción de cloro	Lavanderías comerciales	Agua potable	Educación	Análisis ecológico	Industrias de alimentos, raciones	Industria minera y fabricación y acabado de superficies metálicas	Industria petroquímica	Fabricación de farmacéuticos	Piscinas y balnearios	Generación de energía	Fábricas de pulpa y papel	Fabricación de semiconductores	Residuos sólidos/todos	Industria textil	Agua ultrafiltrada	Aguas residuales industriales	Aguas residuales municipales	Acondicionamiento de agua
Aceite y grasa						♦						♦	♦	♦									♦		
Acidez		♦				♦			♦	♦	♦		♦						♦	♦		♦			♦
Ácido ascórbico				♦																					
Ácido/Base										♦			♦	♦					♦	♦					
Ácido cianúrico						♦			♦		♦						♦								
Ácido eritórbito					♦	♦								♦				♦							♦
Ácido poliacrílico						♦					♦							♦							♦
Ácidos volátiles									♦	♦	♦				♦										♦
Alcalinidad	♦	♦	♦	♦	♦	♦			♦	♦	♦	♦				♦	♦					♦	♦	♦	♦
Aluminio			♦		♦				♦										♦	♦				♦	♦
Arsénico									♦	♦	♦							♦						♦	♦
Bacterias		♦		♦	♦				♦	♦	♦	♦			♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦		♦	♦	♦
Bario						♦					♦				♦	♦								♦	♦
Bifenilos policlorados (PCB)											♦							♦					♦	♦	♦
Boro					♦	♦				♦	♦				♦	♦		♦					♦	♦	♦
Bromo				♦	♦				♦		♦						♦						♦	♦	♦
Cadmio						♦			♦				♦							♦	♦			♦	♦
Calcio	♦			♦	♦						♦				♦								♦		♦
CCA (Compuestos cuaternarios de amonio)					♦	♦					♦							♦							♦
Cianuro									♦		♦		♦		♦									♦	♦
Cloruro	♦	♦		♦	♦	♦			♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦		♦		♦			♦	♦	♦	♦
Cloro	♦	♦	♦	♦	♦		♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦			♦	♦	♦	♦
Cobalto						♦					♦		♦	♦										♦	♦
Cobre		♦	♦	♦	♦	♦			♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦		♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Cobre (Autocatalítico)						♦					♦		♦	♦	♦			♦	♦						♦
Color				♦					♦	♦	♦				♦				♦			♦		♦	♦
Conductividad	♦	♦		♦	♦	♦			♦	♦	♦			♦				♦					♦	♦	♦
Cromato												♦							♦						
Cromato de sodio									♦	♦	♦							♦							
Cromo (Hexavalente)					♦	♦			♦	♦	♦		♦	♦									♦	♦	
Cromo (Total)					♦	♦			♦	♦	♦		♦	♦							♦	♦	♦	♦	♦
Cromo (Trivalente)						♦			♦		♦		♦					♦						♦	
DBO (BOD)				♦					♦	♦	♦			♦	♦				♦		♦	♦	♦	♦	♦
Depurador de oxígeno					♦	♦								♦				♦							♦
Detergentes						♦					♦	♦												♦	♦
Dióxido de carbono		♦		♦	♦				♦	♦	♦														♦
Dióxido de cloro				♦	♦				♦			♦					♦		♦			♦			
DQO (Demanda química de oxígeno)				♦		♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦		♦	♦		♦	♦		♦	♦	

Guía de Aplicaciones

Tabla 1 Guía de aplicaciones (continuación)

	Agricultura	Acicultura	Análisis de acuarios	Agua para bebidas/embotelladas	Agua de calderas/enfriamiento	Industrias químicas	Producción de cloro	Lavanderías comerciales	Agua potable	Educación	Análisis ecológico	Industrias de alimentos, raciones	Industria minera y fabricación y acabado de superficies metálicas	Industria petroquímica	Fabricación de farmacéuticos	Piscinas y balnearios	Generación de energía	Fábricas de pulpa y papel	Fabricación de semiconductores	Desechos sólidos/lodos	Industria textil	Agua ultrapurificada	Agua residuales industriales	Agua residuales municipales	Acondicionamiento de agua
Dureza	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Fenol						◆								◆								◆	◆	◆	◆
Fluoruro				◆					◆											◆			◆	◆	◆
Formaldehído						◆					◆											◆			◆
Fosfato	◆	◆	◆	◆		◆	◆		◆	◆	◆	◆						◆	◆		◆	◆	◆	◆	◆
Fosfonatos					◆	◆			◆	◆	◆	◆												◆	◆
Fósforo	◆					◆	◆		◆	◆	◆	◆						◆				◆	◆	◆	◆
Glicoles						◆			◆		◆			◆											◆
Gluteraldehído						◆			◆	◆														◆	
Hidracina					◆													◆							◆
Hidróxido de sodio													◆						◆		◆				
Hierro (Ferroso)					◆	◆			◆				◆												◆
Hierro (Total)	◆		◆	◆	◆	◆		◆	◆	◆	◆	◆		◆				◆				◆	◆	◆	◆
HPT (Hidrocarburos de petróleo totales)						◆			◆		◆							◆					◆		
Manganeso				◆		◆			◆														◆	◆	◆
Mercurio						◆			◆												◆		◆	◆	◆
Molibdeno				◆	◆	◆	◆		◆		◆				◆			◆			◆	◆	◆	◆	◆
Níquel						◆			◆		◆		◆							◆			◆	◆	◆
Nitrógeno amoniacal	◆	◆	◆		◆	◆			◆	◆	◆	◆		◆				◆				◆	◆	◆	◆
Nitrógeno (Inorgánico)						◆			◆		◆													◆	
Nitrógeno (Monocloramina)									◆															◆	◆
Nitrógeno (Nitrito)	◆	◆	◆	◆	◆				◆	◆	◆	◆										◆	◆	◆	◆
Nitrógeno (Nitrito)		◆	◆		◆				◆	◆	◆	◆												◆	
Nitrógeno (TKN)	◆					◆			◆	◆	◆	◆								◆			◆	◆	◆
Nitrógeno (Total)						◆			◆	◆	◆	◆										◆	◆	◆	◆
Oxígeno disuelto	◆	◆		◆	◆			◆	◆	◆	◆	◆						◆				◆	◆	◆	◆
Ozono		◆		◆	◆			◆	◆		◆				◆							◆	◆	◆	◆
Paladio													◆							◆					
Permanganato									◆									◆							
Peróxido de hidrógeno						◆			◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆				◆			◆	◆	◆	◆
pH	◆	◆	◆	◆	◆	◆		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Plata						◆			◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆		◆	◆	◆
Plomo			◆						◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆		◆	◆	◆
Potasio	◆								◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆		◆	◆	◆
Quelantes					◆	◆			◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆				◆
Salinidad	◆	◆				◆			◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆				◆
SDT		◆		◆	◆				◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆		◆	◆	◆
Selenio									◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆		◆	◆	◆

**ANEXO C.
NORMA PARA VERTIMIENTOS DE AGUAS EN ACTIVIDADES MINERAS**

PARÁMETRO	UNIDADES	EXTRACCIÓN DE CARBÓN DE PIEDRA Y LIGNITO
Hydrocarburos totales (HTP)	<i>mg/L</i>	10.00
Iones		
Cianuro Total (CN ⁻)	<i>mg/L</i>	1.00
Cloruros (Cl ⁻)	<i>mg/L</i>	500.00
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	<i>mg/L</i>	1,200.00
Sulfuros (S ²⁻)	<i>mg/L</i>	1.00
Metales y Metaloides		
Arsénico (As)	<i>mg/L</i>	0.10
Cadmio (Cd)	<i>mg/L</i>	0.05
Cinc (Zn)	<i>mg/L</i>	3.00
Cobre (Cu)	<i>mg/L</i>	1.00
Cromo (Cr)	<i>mg/L</i>	0.50
Hierro (Fe)	<i>mg/L</i>	2.00
Mercurio (Hg)	<i>mg/L</i>	0.002
Niquel (Ni)	<i>mg/L</i>	0.50
Plomo (Pb)	<i>mg/L</i>	0.20

87

⁸⁷ Tomado de la resolución 0631 de 17 de marzo del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia

**ANEXO D.
NORMA PARA USO DE AGUAS TRATADAS EN AGRICULTURA**

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR LÍMITE MEDIDO PERMISIBLE
Físicos		
pH	Unidades de pH	6.0 – 9.0
Conductividad	µs/cm	1,500.0
Químicos		
Fenoles totales	<i>mg/L</i>	1.5
Hidrocarburos totales	<i>mg/L</i>	1.0
Iones		
Cianuro Libre	<i>mg/L</i>	0.2
Cloruros	<i>mg/L</i>	300.0
Fluoruros	<i>mg/L</i>	1.0
Sulfatos	<i>mg/L</i>	500.0
Metales		
Aluminio	<i>mg/L</i>	5.0
Berilio	<i>mg/L</i>	0.1
Cadmio	<i>mg/L</i>	0.01
Cinc	<i>mg/L</i>	3.0

Cobalto	<i>mg/L</i>	0.05
Cobre	<i>mg/L</i>	1.0
Cromo	<i>mg/L</i>	0.1
Hierro	<i>mg/L</i>	5.0
Mercurio	<i>mg/L</i>	0.002
Litio	<i>mg/L</i>	2.5
Manganeso	<i>mg/L</i>	0.2
Molibdeno	<i>mg/L</i>	0.07
Níquel	<i>mg/L</i>	0.2
Plomo	<i>mg/L</i>	5.0
Sodio	<i>mg/L</i>	200.0
Vanadio	<i>mg/L</i>	0.1
Metaloides		
Arsénico	<i>mg/L</i>	0.1
Boro	<i>mg/L</i>	0.4

**ANEXO E.
ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO AÑO 2011 DEL AR**



ANALIZAR LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO LTDA.

MONITOREO Y CONSULTORIA
NIT 826 000 346-1



Duitama, 17 de Marzo de 2011

**INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS
AG10454 - 11**

IDENTIFICACION

Solicitante: **MINA 2 LTDA.**
 Dirección: Vereda El Vijal San Mateo
 Ensayo Realizado: Físicoquímico
 Tipo de Agua: Drenaje minero
 Sitio de Muestreo: Mina 2 contrato FKA 141 - Vereda el Vijal San Mateo
 Punto Exacto de Toma: Bocamina
 Tipo de Muestreo: Simple
 Fecha y Hora de Muestreo: 04/03/2011 N.I.
 Recolectada por: Solicitante
 Fecha y Hora de Recepción: 09/03/2011 09:00
 Objeto: Caracterización
 Condición de Recepción: Al clima en recipiente plástico del cliente
 Periodo de Análisis: De 09/03/2011 a 16/03/2011

DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN	VALOR OBTENIDO	VALOR MAX ACEPTABLE	METODO
ENSAYO				
pH	Unidades	3,01	5,0 a 9,0	Electrométrico
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	312,4	N.A.	Volumétrico
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	1975	N.A.	Complexométrico EDTA
Conductividad	microsiemens/cm	3560	N.A.	Electrodo específico
Hierro Total	mg/L Fe	46,5	N.A.	De la Fenantrolina
Sulfatos	mg/L SO ₄ ²⁻	1970	N.A.	Turbidimétrico
Turbiedad	U.N.T.	77,1	N.A.	Nefelométrico
Sólidos suspendidos totales	mg/L	61	N.A.	Filtración/Gravimétrico
Sólidos sedimentables	ml/L	1,8	N.A.	Del Cono Imhoff

PAGINA: 1 DE 2

**ANEXO H.
ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO AÑO 2014 DEL AR**



ANALIZAR LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO LTDA.

MONITOREO Y CONSULTORIA

NT. 826 000 346-1



Duitama, 05 de Abril de 2014

**INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS
AG16445 - 14**

IDENTIFICACION

Solicitante: **MINA 2 LTDA.**
 Dirección: Vereda El Vijal San Mateo
 Ensayo Realizado: Físicoquímico
 Tipo de Agua: Drenaje minero
 Sitio de Muestreo: Mina 2 - Vereda el Vijal San Mateo
 Punto Exacto de Toma: Salida Filtros
 Tipo de Muestreo: Simple
 Fecha y Hora de Muestreo: 20/03/2014 10:00
 Recolectada por: Emiro Duarte
 Fecha y Hora de Recepción: 28/03/2014 10:05
 Objeto: Caracterización
 Condición de Recepción: Al clima en recipiente del cliente
 Periodo de Análisis: De 28/03/2014 a 05/04/2014

DESCRIPCION	EXRESION	VALOR OBTENIDO	VALOR MAX ACEPTABLE	METODO
ENSAYO				
pH (A)	Unidades	8,27	4,5 a 9,0	SM 4500-H+ B
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	<6,37	N.E.	SM 2310 B
Dureza Total (A)	mg/L CaCO ₃	231	N.E.	SM 2340 C
Conductividad (A)	microsiemens/cm	3080	N.E.	SM 2510 B
Hierro Total	mg/L Fe	0,72	5,0	SM 3500-Fe
Sulfatos (A)	mg/L SO ₄ ²⁻	836	N.E.	SM 4500-SO4-2 E
Turbiedad (A)	U.N.T.	23,6	N.E.	SM 2130 B
Sólidos suspendidos totales (A)	mg/L	< 9	N.E.	SM 2540 D
FIN DE LOS ENSAYOS				

NE= No Establecido (A)= Acreditado Métodos enunciados referenciados al *Standard Methods 22nd Edition*
NA= No Aplica

OBSERVACIONES:

Los parámetros físicoquímicos caracterizados se comparan con lo descrito en el artículo 40, y 41 del decreto 1594 de 1984, sobre normas de uso del recurso (Comparación transitoria acorde con el artículo 76 del decreto 3930 de Octubre del 2010)

Los resultados analíticos del presente informe se obtuvieron siguiendo los métodos anunciados, mediante procedimientos internos del Sistema de calidad y corresponden exclusivamente a la muestra recolectada por el solicitante. Solo es valido éste informe en papel oficial de Analizar Ltda. con las firmas autorizadas y con sello seco. Este informe no se puede reproducir parcialmente, salvo previa autorización escrita del Laboratorio.

PAGINA: 1 DE 2

ANEXO K. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO AÑO 2018 DEL AR



ANALIZAR LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO LTDA.

MONITOREO Y CONSULTORIA

NIT. 826 000.346-1

Calidad Certificada y Confiabilidad Acreditada



Duitama, 2018/08/18

INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS AG24741 - 18

IDENTIFICACIÓN

Cliente:	MINA 2 LTDA.
Dirección del Cliente:	Vereda El Vijal San Mateo
Ensayo Realizado:	Físicoquímico
Tipo de Agua:	Drenaje Minero
Sitio de Muestreo:	Vereda El Vijal San Mateo
Punto de Toma:	Salida de Tratamiento
Tipo de Muestreo:	Simple
Fecha y Hora de Muestreo:	2018/08/06 11:00
Recolectada por:	El Solicitante - Guillermo Mesa
Fecha y Hora de Recepción:	2018/08/10 15:10
Objeto:	Caracterización
Condición de Recepción:	Al Clima - En Recipiente del Cliente
Período de Análisis:	De 2018/08/10 a 2018/08/18

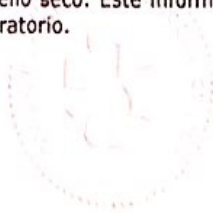
DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN	VALOR OBTENIDO	VALOR MAX. ACEPTABLE	MÉTODO
ANÁLISIS EN LABORATORIO				
pH	Unidades de pH	8,04	N.E.	SM 4500-H ⁺ B
DOO Total (A)	mg O ₂ /L	50	N.E.	SM 5220 D
DBO ₅ Total (A)	mg O ₂ /L	<2	N.E.	SM 5210 B, 4500- O C
Sólidos suspendidos totales (A)	mg SST/L	67	N.E.	SM 2540 D
Sólidos sedimentables (A)	mL SS/L	0,1	N.E.	SM 2540 F
Grasas y Aceites (A)	mg AyG/L	<7,13	N.E.	SM 5520 B
Fenoles Totales (A)	mg Fenol/L	0,07	N.E.	SM 5530 B, D
Detergentes (S.A.A.M) (A)	mg SAAM/L	0,28	N.E.	SM 5540 C
FIN DE LOS ENSAYOS				

NE= No Establecido (A)= Acreditado Métodos enunciados referenciados al *Standard Methods 2017 edition 23rd*

NA= No Aplica

OBSERVACIONES:

Los resultados analíticos del presente informe se obtuvieron siguiendo los métodos enunciados, mediante procedimientos internos del Sistema de Calidad y corresponden exclusivamente a la muestra recibida, **recolectada por el solicitante**. Sólo es válido éste informe en papel oficial de Analizar Ltda. con las firmas autorizadas y con sello seco. Este informe no se puede reproducir parcialmente, salvo previa autorización escrita del Laboratorio.



GT-INF-01/F.R. Enero-18/v. 1

PAGINA: 1 DE

CARRERA 33 N° 16-27 TEL 7614955- 7614647- 313 815 0403 DUITAMA E-mail: dtanalizar@gmail.com

ANEXO N. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO AÑO 2019 DEL AR



ANALIZAR LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO LTDA.

MONITOREO Y CONSULTORIA

NIT. 8926.0000.346-1

Calidad Certificada y Confiabilidad Acreditada

Duitama, 2019/03/18



INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS AG26042 - 19

IDENTIFICACIÓN

Cliente: MINA 2 LTDA.
Dirección del Cliente: Vereda El Vijal San Mateo
Ensayo Realizado: Físicoquímico
Tipo de Agua: Drenaje Minero
Sitio de Muestreo: Vereda El Vijal - Planta de Tratamiento San Mateo
Punto de Toma: Tanque Neutralizador
Tipo de Muestreo: Simple
Fecha y Hora de Muestreo: 2019/02/24 15:30
Recolectada por: El Solicitante - Gustavo Duarte Blanco
Fecha y Hora de Recepción: 2019/02/25 14:40
Objeto: Caracterización
Condición de Recepción: Al Clima - En Recipiente del Cliente
Periodo de Análisis: De 2019/02/25 a 2019/03/14 Plan De Muestreo N.A.

DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN	VALOR OBTENIDO	VALOR MAX. ACEPTABLE	METODO
ANÁLISIS EN LABORATORIO				
Conductividad (A)	microsiemens/cm	4350	N.E.	SM 2510 B
Cloruros (A)	mg Cl/L	<5,41	500,00	SM 4500-Cl ⁻ B
Sulfatos (A)	mg SO ₄ ²⁻ /L	2554	1200,00	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E
* Sodio (A)	mg Na/L	0,05	N.E.	SM 3111 B
Sólidos suspendidos totales (A)	mg SST/L	15	50,00	SM 2540 D
Hierro Total	mg Fe/L	0,11	2,00	SM 3500-Fe
Manganeso	mg Mn/L	0,68	N.E.	SM 3500-Mn B
Sulfuros	mg S ²⁻ /L	<0,02	1,00	SM 4500-S ²⁻ F
FIN DE LOS ENSAYOS				

NE= No Establecido (A)= Acreditado Métodos enunciados referenciados al *Standard Methods 2017 edition 23rd*

* Variable Subcontratada

NA= No Aplica

OBSERVACIONES:

Las variables físicoquímicas caracterizadas se encuentran dentro de los valores máximos aceptables, establecidos acorde con lo descrito en el artículo 10 de la Resolución 0631 del 17 de Marzo de 2015, sobre normas de Vertimiento de Extracción de Carbon de Piedra y Lignito a Cuerpo de Agua, excepto, Sulfatos.

Los resultados analíticos del presente informe se obtuvieron siguiendo los métodos anunciados, mediante procedimientos internos del Sistema de calidad y corresponden exclusivamente a la muestra **recolectada por el solicitante**. Sólo es válido éste informe en papel oficial de Analizar Ltda. con las firmas autorizadas y con sello seco. Este informe no se puede reproducir parcialmente, salvo previa autorización escrita del Laboratorio.

11-03-2019 10:10:10 AM

GT-INF-01/F.R: Enero-18/v.1.1
PAGINA: 1 DE 2

CARRERA 33 N° 16-27 TEL 7614955- 7614647- 313 815 0403 DUITAMA E-mail: dtanalizar@gmail.com

ANEXO Q.
FICHA TÉCNICA DE RESINA LEWATIT MONOPLUS MP68

INFORMACIÓN DE PRODUCTO
LEWATIT® MonoPlus MP 68



Descripción general

Forma de suministro	Base libre/Cl
Grupo funcional	Amina terciaria / cuaternaria
Matriz	Poliestireno reticulado
Estructura	Macroporosa
Aspecto	Beige, opaco

Propiedades físico-químicas

		Unidades métricas	
Coefficiente de uniformidad*		máx.	1,1
Tamaño medio del grano*		mm	0,55 (+/- 0,05)
Densidad aparente	(+/- 5 %)	g/l	620
Densidad		aprox. g/ml	1,04
Contenido en agua		% en peso	54 - 60
Capacidad total*		min. eq/l	1,3
Variación de volumen	hinchamiento total (forma suministro --> Cl)	típico, % vol.	24
Estabilidad	rango de pH		0 - 14
Almacenaje	del producto	máx. años	2
Almacenaje	rango de temperatura	°C	-20 - +40

* Valores de especificación; su cumplimiento es objeto de control permanente.

ANEXO S. CONTENEDORES REQUERIDOS, TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN Y TIEMPOS DE ESPERA

INFORMACIÓN DE PRODUCTO
LEWATIT® MonoPlus MP 68



Condiciones de funcionamiento recomendadas*

		Unidades métricas	
Temperatura de trabajo		máx. °C	70
Rango de pH de trabajo			0 - 7
Altura de lecho		min. mm	800
Pérdida de presión específica	(15 °C)	aprox. kPa*h/m ²	0,8
Pérdida de presión		máx. kPa	300
Velocidad lineal	carga	máx. m/h	60
Velocidad lineal	contra lavado (20 °C)	aprox. m/h	4
Expansión del lecho	(20 °C, por m/h)	aprox. % vol.	21
Zona libre	contra lavado (externo / interno)	% vol.	100
Regenerante			NaOH
Regeneración a contra corriente	nivel	aprox. g/l	50
Sistema-WS	concentración	aprox. % en peso	2 - 4
Velocidad lineal	regeneración	aprox. m/h	5
Velocidad lineal	lavado	aprox. m/h	5
Regeneración a cocorrente	nivel	aprox. g/l	50 - 80
Regeneración a cocorrente	concentración	aprox. % en peso	3 - 5
Velocidad lineal	regeneración	aprox. m/h	5
Velocidad lineal	lavado	aprox. m/h	5
Consumo de agua de lavado	lento / rápido	aprox. BV	8

* Las condiciones de operación recomendadas hacen referencia a la utilización del producto bajo condiciones de trabajo normales. Están basadas en ensayos en plantas piloto y datos obtenidos de aplicaciones industriales. No obstante, para calcular los volúmenes de resina necesarios para una instalación de intercambio iónico son precisos datos adicionales.

Nº de parámetro/Nombre	Contenedor ²	Conservación ^{3,4}	Tiempo máximo de espera ⁵
Tabla 1A - Pruebas de bacterias			
1-4. Coliforme, fecal y total	P, V	Frío, 4°C, 0,008% Na ₂ S ₂ O ₃ ⁶	6 horas
5. Estreptococo fecal	P, V	Frío, 4°C, 0,008% Na ₂ S ₂ O ₃	6 horas
Tabla 1B - Pruebas inorgánicas			
1. Acidez	P, V	Frío, 4°C	14 días
2. Alcalinidad	P, V	Frío, 4°C	14 días
4. Amoníaco	P, V	Frío, 4°C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
9. Demanda bioquímica de oxígeno (BOD)	P, V	Frío, 4°C	48 horas
10. Boro	P, PFTE o cuarzo	HNO ₃ a pH<2	6 meses
11. Bromuro	P, V	No se requiere	28 días
14. Demanda bioquímica de oxígeno carbonado	P, V	Frío, 4°C	48 horas
15. Demanda química de oxígeno	P, V	Frío, 4°C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
16. Cloruro	P, V	No se requiere	28 días
17. Cloro, total residual	P, V	No se requiere	Analice inmediatamente
21. Color	P, V	Frío, 4°C	48 horas
23-24. Cianuro, total y sujeto a cloración	P, V	Frío, 4°C, NaOH a pH>12, 0,6 g Acido ascórbico	14 días ⁷
25. Fluoruro	P	No se requiere	28 días
27. Dureza	P, V	HNO ₃ a pH<2, H ₂ SO ₄ a pH<2	6 meses
28. Ion de hidrógeno (pH)	P, V	No se requiere	Analice inmediatamente
31, 43. Nitrógeno orgánico y Kjeldahl	P, V	Frío 4°C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
Metales⁸			
18. Cromo VI	P, V	Frío, 4°C	24 horas
35. Mercurio [3, 5-8, 12, 13, 19, 20, 22, 26, 29, 30, 32-34, 36, 37, 45, 47, 51, 52, 58-60, 62, 63, 70-72, 74, 75] ⁹	P, V	HNO ₃ a pH<2	6 meses
Metales, excepto el boro, cromo VI y mercurio			
38. Nitrato	P, V	Frío, 4°C	48 horas
39. Nitrato-nitrito	P, V	Frío 4°C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
40. Nitrito	P, V	Frío, 4°C	48 horas
41. Aceite y grasa	V	Frío, 4°C, HCl o H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
42. Carbono orgánico	P, V	Frío, 4°C, HCl o H ₂ SO ₄ o H ₃ PO ₄ a pH<2	28 días
44. Ortofosfato	P, V	Filtrelo inmediatamente; Frío, 4°C	48 horas
46. Sonda de oxígeno disuelto	V Botella y parte superior	No se requiere	Analice inmediatamente
47. Winkler	V Botella y parte superior	Fijelo en el sitio y almacene en lugar oscuro	8 horas
48. Fenol	V únicamente	Frío 4°C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
49. Fósforo elemental	V	Frío, 4°C	48 horas

**ANEXO T.
COMPORTAMIENTO TEÒRICO DE LA DUREZA**

