



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL**

Propuesta de tratamiento aguas duras, para el sistema de regadío de la
comunidad La Primavera

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental

Autores:

Aguinda Paneso, Christian Jonatan
Jiménez Zaruma, Juan Francisco

Tutor:

PhD. José Gregorio Prato

Riobamba, Ecuador. 2024

DEDICATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, **Christian Jonatan Aguinda Paneso**, con cédula de ciudadanía **2100831888** y **Juan Francisco Jimenez Zaruma** con cédula de ciudadanía **1900859321**, autores del trabajo de investigación titulado: **Propuesta de tratamiento aguas duras, para el sistema de regadío de la comunidad La Primavera**, certificamos que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedemos a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a los 18 días del mes de octubre de 2024.



Christian Jonatan Aguinda Paneso
C.I: 2100831888



Juan Francisco Jimenez Zaruma
C.I: 1900859321



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento
 SGC
SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **JIMÉNEZ ZARUMA JUAN FRANCISCO** con CC: **1900859321**, estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Propuesta de tratamiento aguas duras, para el sistema de regadío de la comunidad La Primavera**", cumple con el **8%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagió **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente, autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 02 de octubre de 2024



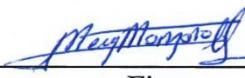
PhD. José Prato
TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Propuesta de tratamiento aguas duras, para el sistema de regadío de la comunidad La Primavera, presentado por **Juan Francisco Jiménez Zaruma**, con cédula de identidad número **1900859321** y **Christian Jonatan Aguinda Paneso**, con cédula de identidad número **2100831888**, bajo la tutoría de Ph.D. José Gregorio Prato Moreno; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de sus autores; no teniendo más nada que observar.

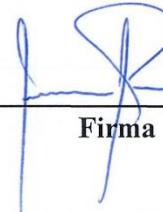
De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba octubre de 2024.

Presidente del Tribunal de Grado
Dra. Mery Manzano Cepeda



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
Ph.D. Iván Ríos García



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
MSc. Marcel Paredes Herrera



Firma



CERTIFICACIÓN

Que, **AGUINDA PANESO CHRISTIAN JONATAN** con CC: **2100831888**, estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Propuesta de tratamiento aguas duras, para el sistema de regadío de la comunidad La Primavera**", cumple con el **8%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio TURNITIN, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 02 de octubre de 2024

José G. Prato Horcajo

PhD. José Prato
TUTOR

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mi madre Olga Jiménez y a mis hermanos Nayell Urdiales, Daniel Ocampo y Samantha Jiménez, quienes siempre han estado incondicionalmente y han sido los pilares en mi vida por los que he podido cumplir una meta más y poder salir adelante.

A su vez me gustaría agradecer a mis buenos amigos y amigas que he podido hacer y conocer durante todo este proceso durante mi estancia en la Universidad, agradecer a Natasha, Víctor, Jazmín, Shearley, Katherine, Axel, Robinson, Joshep, Christian, Diego, Paulina; con los cuales he compartido gratos momentos.

Quiero en especial agradecer a mi tío Rober Jiménez el cual a pesar de la distancia me ha brindado su apoyo y buenos consejos.

Finalmente, este trabajo es en honor de mis abuelos Juan Jiménez y Rosa Zaruma.

Juan Francisco Jiménez Zaruma

El presente trabajo de investigación se lo dedico a mi madre Lilia Paneso quien con su apoyo incondicional, consejos y palabras motivadoras me ha inspirado a alcanzar mis objetivos, igualmente a mi pareja Shearley Villegas por siempre estar presente y apoyándome durante toda esta trayectoria y en especial a mi hija Lilia Itzel Aguinda Villegas quien es mi mayor logro.

De igual manera a mis hermanas Dalila, Diana, Jessica, Karina, Gabriela y Josselyn, quienes siempre me han mostrado su apoyo y cariño a lo largo de mi vida. También a mis compañeros y amigos quienes durante toda mi preparación académica me brindaron su amistad y apoyo incondicional en especial a Jazmín Torres, Vinicio Monar y Juan Jiménez.

Finalmente, dedico este trabajo y todos mis logros futuros a la memoria de mi padre, Jonathan Aguinda.

Christian Jonatan Aguinda Paneso

AGRADECIMIENTO

Quiero empezar dando gracias, Dios por la salud que me ha brindado a mí y a mis familiares y por permitirme cerrar esta etapa en mi vida a mi madre Olga por siempre apoyarme y preocuparse por mi este es un logro compartido con ella, agradecer a mi hermana Nayell por siempre estar al pendiente de mí y ser un apoyo incondicional más en mi vida, a mis hermanos menores Daniel y Samantha que a pesar de todo siempre han estado ahí y a mi querido sobrino Andre Urdiales que ha sido una alegría en este proceso.

Agradecer personal y profesionalmente a mi tutor el Ing. José Gregorio Prato PhD., por aceptarme como su tesista y por la guía brindada durante este proceso que ha durado 2 años, agradecer al Ing. Marco Rodríguez por involucrarse en las visitas a la comunidad y en el trato con sus moradores, así mismo agradecer a los técnicos encargados de los laboratorios en la Universidad como el Ing. Juan Lara el Ing. José La Torre y la Dra. Nancy Orozco por la ayuda brindada en la etapa experimental.

Finalmente, agradezco a mis amigos y amigas por hacer que esta etapa sea más divertida y entrañable.

Juan Francisco Jiménez Zaruma

En primer lugar, agradezco a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. A mi madre Lilia Paneso, por su amor, apoyo incondicional y por enseñarme el valor del esfuerzo. A mis hermanas Dalila, Diana, Jessica, Karina, Gabriela y Josselyn, quienes siempre me han alentado con su cariño y respaldo. A mi pareja, por estar a mi lado en los momentos más difíciles y compartir cada logro, y a mi hija, por ser la mayor inspiración de mi vida.

A mis amigos, por su compañía y aliento a lo largo de esta etapa académica, y a la memoria de mi padre, Jonathan Aguinda, a quien agradezco con todo mi corazón su guía y enseñanzas.

Finalmente, a mi tutor de tesis el PhD. José Prato, por dejarnos formar parte de su semillero, amistad, conocimiento y guía que fueron fundamentales para la realización de este proyecto.

Christian Jonatan Aguinda Paneso

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE TABLAS	
ÍNDICE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	17
1.1 Antecedentes	17
1.2 Planteamiento del Problema	18
1.3 Justificación	19
1.4 Objetivos.....	20
1.4.1 General	20
1.4.2 Específicos.....	20
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	21
2.1 Generalidades del Agua.....	21
2.2 Tipos de Agua.....	21
2.3 Métodos de Riego	22
2.4 Clasificación de los Tipos de Riego	22
2.4.1 Riego por superficie	22
2.4.2 Riego presurizado	23
2.5 Contaminación del Agua	24
2.6 Dureza del Agua.....	25
2.6.1 Tipos de Dureza del Agua	25
2.6.2 Clasificación de Aguas con Dureza	26
2.7 Adsorción y su Aplicación en el Tratamiento de Aguas Duras	26
2.7.1 Tipos de Adsorción	27
2.7.2 Equilibrio de Adsorción.....	27
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	29
3.1 Tipo de Investigación	29
3.2 Diseño de la Investigación.....	29

3.3	Población y Muestra.....	29
3.3.1	Población.....	29
3.3.2	Muestra.....	30
3.4	Técnicas e Instrumentos	30
3.5	Metodología.....	31
3.6	Fase I. Diagnóstico de la Problemática	31
3.7	Fase II. Caracterización de las Aguas de Riego	32
3.7.1	Muestreo de Agua	32
3.8	Fase III. Pruebas de Adsorción	35
3.8.1	Etapa I: Preparación de los Lechos de Adsorción a partir de los Materiales Litológicos Oxídicos.....	35
3.8.2	Etapa II. Pruebas de Equilibrio de Adsorción.....	38
3.8.3	Etapa III. Pruebas en Columnas	39
3.9	Fase IV. Propuesta	42
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		43
4.1	Problemática en la Comunidad La Primavera.....	43
4.1.1	Características de la Comunidad La Primavera	43
4.2	Descripción de la Problemática en el Sistema de Riego.....	45
4.3	Caracterización Fisicoquímica del Agua	46
4.4	Estudio del Proceso de Adsorción.....	47
4.4.1	Equilibrio de Adsorción	47
4.4.2	Adsorción en Columnas.....	49
4.4.3	Pruebas de Adsorción con Lechos Sin Activar (Natural)	49
4.4.4	Pruebas de Adsorción con Lechos Activados con NaOH (Básico).....	50
4.4.5	Pruebas de Adsorción de con Lechos Activados con HCl (ácido).....	52
4.4.6	Eficiencia de Adsorción de los Lechos	53
4.4.7	Pruebas de Adsorción con Lechos Mixtos	55
4.4.8	Prueba de Saturación de los Lechos	58
4.4.9	Eficiencia en las Pruebas de Saturación	59
CAPÍTULO V. PROPUESTA.....		60
5.1	Bases de Partida del Presente Proyecto	60
5.2	Condiciones Preliminares del Sistema de Tratamiento	60
5.3	Localización del Sistema de Tratamiento.....	60
5.4	Estimación del Caudal.....	61
5.5	Selección de Unidades del Sistema de Tratamiento.....	62
5.6	Tanque de Activación.....	63
5.7	Columnas de Adsorción	64

5.8	Etapas del Proceso de Adsorción	64
5.8.1	Preparación de la Columna.....	64
5.8.2	Empaquetamiento de la Columna	64
5.8.3	Acondicionamiento del Material Adsorbente	64
5.8.4	Etapa de Funcionamiento	64
5.9	Tanque de Almacenamiento y Distribución.....	65
5.10	Pre-Diseño de las Unidades del Sistema de Tratamiento del Agua de Riego.....	65
5.10.1	Bomba Periférica	65
5.10.2	Diseño y Escalado de las Columnas de Adsorción	66
5.10.3	Procedimiento Para el Escalado de las Columnas.....	66
5.10.4	Pre-Dimensionamiento de las Columnas.....	68
5.10.5	Tanque de activación del material adsorbente	70
5.10.6	Procedimiento para el escalado del tanque de alimentación.....	70
5.10.7	Resultados del Pre-Dimensionamiento del Tanque.....	71
5.10.8	Tanque para el Almacenamiento de agua cruda.	72
5.10.9	Sistemas de Válvulas de Compuertas.....	73
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		76
6.1	CONCLUSIONES	76
6.2	RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA		78
ANEXOS		82
Anexo 1. Recolección del Material Litológico Oxídico y del Agua de Riego		82
Anexo 2. Dimensionamiento del Tanque de Captación		82
Anexo 3. Medición de Parámetros Fisicoquímicos del Agua de Riego		82
Anexo 4. Equipos Empleados en el Desarrollo de la Tesis		83
Anexo 5. Resultados Comparativos de la Adsorción de Iones de Dureza.....		85

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación de los métodos de riego.....	22
Tabla 2.	Clasificación de aguas con dureza.....	26
Tabla 3.	Tabla de parámetros fisicoquímicos.....	33
Tabla 4.	Coordenadas de recolección del material litológico Santa Clara, Santa Teresa.....	35
Tabla 5.	Coordenadas de ubicación de la comunidad La Primavera	44
Tabla 6.	Ánalysis fisicoquímico del agua de riego de la comunidad.....	46
Tabla 7.	Módulo de riego mensualmente según el tipo de cultivo	62
Tabla 8.	Características de la bomba periférica.....	66
Tabla 9.	Características de la columna usada en laboratorio.....	66
Tabla 10.	Resumen del cálculo para los valores a considerar	69
Tabla 11.	Características de la tolva sugerida como columna de adsorción	70
Tabla 12.	Datos para el escalo del Tanque Activación	71
Tabla 13.	Características del tanque de activación seleccionado comercialmente	71
Tabla 14.	Dimensionamiento del tanque de almacenamiento	72
Tabla 15.	Características de la válvula de compuerta.....	73
Tabla 16.	Costo estimado del sistema de Tratamiento por adsorción.....	75

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.	Riego por surcos adaptada a cultivos sembrados en línea	23
Figura 2.	Riego por melgas a modo de franjas	23
Figura 3.	Riego por goteo donde se forma un bulbo húmedo debajo de cada goteo.....	24
Figura 4.	Riego por microaspersión con un soporte clavado al suelo	24
Figura 5.	Técnica de aspersión con un sistema elevada por presión	24
Figura 6.	Términos básicos de adsorción	27
Figura 7.	Reunión con moradores de la comunidad La Primavera	31
Figura 8.	Observación del sistema de riego y medición de parámetros del agua	31
Figura 9.	Recipientes utilizados para la recolección de agua	32
Figura 10.	Laboratorio de Servicios Ambientales, UNACH.....	32
Figura 11.	Medidores de pH y conductividad eléctrica.....	34
Figura 12.	Instrumentos de precisión.....	34
Figura 13.	Espectrofotómetro UV/Visible	34
Figura 14.	Mapa de ubicación del material litológico.....	35
Figura 15.	Recolección de las arcillas.....	36
Figura 16.	Secado del material	36
Figura 17.	Tamizador automático y tamices	37
Figura 18.	Pasta de arcilla	37
Figura 19.	Tiras de lecho y cortes de lechos.....	37
Figura 20.	Mufla de calcinación	38
Figura 21.	Lechos calcinados	38
Figura 22.	Pesado de arcilla	39
Figura 23.	Sistema de filtración.....	40
Figura 24.	Bolsas de lecho de 250g	40
Figura 25.	Solución diluida	41
Figura 26.	Ánálisis de los iones en el agua durante las pruebas de adsorción en columna	41
Figura 27.	Comunidad La Primavera.....	43
Figura 28.	Mapa de ubicación de la comunidad La Primavera.....	44
Figura 29.	Quebrada El Cedro y sistema de captación	44
Figura 30.	Representación del sistema de captación para la red de riego actual	45
Figura 31.	Tuberías y equipos del sistema de riego	46
Figura 32.	Tiempo de equilibrio de adsorción de la dureza del agua con los lechos: A) Santa Claray B) Santa Teresa.....	48
Figura 33.	Tiempo de equilibrio de adsorción de los cloruros del agua con los lechos: A) SantaClara	

y B) Santa Teresa.....	48
Figura 34. Tiempo de equilibrio de adsorción de los sulfatos del agua con los lechos: A) SantaClara y B) Santa Teresa.....	49
Figura 35. Adsorción de la dureza con lechos sin activar (Natural) A) Santa Clara y B) SantaTeresa	49
Figura 36. Adsorción de iones cloruros con lechos sin activar (Natural) A) Santa Clara y B) Santa Teresa	50
Figura 37. Adsorción de iones sulfatos con lechos sin activar (Natural) A) Santa Clara y B) Santa Teresa	50
Figura 38. Adsorción de la dureza con lechos activados con NaOH: A) Santa Clara y B) SantaTeresa	51
Figura 39. Adsorción de iones cloruros con lechos activados con NaOH: A) Santa Clara y B)Santa Teresa	51
Figura 40. Adsorción de iones sulfatos con lechos activados con NaOH: A) Santa Clara y B)Santa Teresa	51
Figura 41. Adsorción de la dureza con lechos activados con HCl: A) Santa Clara y B) SantaTeresa	52
Figura 42. Adsorción de iones cloruros con lechos activados con HCl: A) Santa Clara y B) Santa Teresa	52
Figura 43. Adsorción de iones sulfatos con lechos activados con HCl: A) Santa Clara y B) Santa Teresa	53
Figura 44. Comparativa entre las pruebas de adsorción de la dureza lechos A) Santa Clara y B)Santa Teresa	53
Figura 45. Porcentaje de eficiencia en la adsorción de la dureza	54
Figura 46. Comparativa entre las pruebas de adsorción de Cloruros lechos A) Santa Clara y B)Santa Teresa	54
Figura 47. Porcentaje de eficiencia en la adsorción de cloruros.....	54
Figura 48. Comparativa entre las pruebas de adsorción de sulfatos lechos A) Santa Claray B) Santa Teresa	55
Figura 49. Porcentaje de eficiencia en la adsorción de sulfatos	55
Figura 50. Adsorción de dureza con lechos mixtos A) Santa Clara y B) Santa Teresa.....	56
Figura 51. Porcentaje de eficiencia de adsorción de dureza con lechos Mixtos	56
Figura 52. Adsorción de cloruros con lechos mixtos A) Santa Clara y B) Santa Teresa	57
Figura 53. Porcentaje de eficiencia de adsorción de cloruros con lechos Mixtos.....	57
Figura 54. Adsorción de sulfatos con lechos mixtos A) Santa Clara y B) Santa Teresa.....	57
Figura 55. Porcentaje de eficiencia de adsorción con lechos Mixtos.....	58
Figura 56. Prueba de saturación de los lechos, reducción de la dureza A) Santa Clara y B)Santa Teresa	58
Figura 57. Prueba de saturación de los lechos, reducción de cloruros A) Santa Clara y B)Santa Teresa	59
Figura 58. Prueba de saturación de los lechos, reducción de sulfatos A) Santa Clara y B)Santa	

Teresa	59
Figura 59. Porcentajes de eficiencia en las pruebas de saturación.....	59
Figura 60. Ubicación de los ramales de riego	61
Figura 61. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento propuesto.....	63
Figura 62. Esquema interno de la columna de adsorción	65
Figura 63. Dimensiones del tanque de captación	72
Figura 64. Esquema del Diseño del Sistema de Tratamiento de Agua para Riego en laComunidad La Primavera	74
Figura 65. Sistema de tratamiento por adsorción	74
Figura 66. Recolección de arcilla	82
Figura 67. Recolección de muestras de agua.....	82
Figura 68. Medición del largo del tanque	82
Figura 69. Medición del ancho del compartimiento	82
Figura 70. Medición de concentraciones	82
Figura 71. Medición del pH y temperatura	82
Figura 72. Columnas de Adsorción	83
Figura 73. Turbidímetro portátil2100Q	83
Figura 74. Tamiz vibratorio para laboratorio	83
Figura 75. Tamizadores de 250, 150 y 75 μm	83
Figura 76. Mufla Thermolyne de 1700 °C	83
Figura 77. Mufla Horno BIOBASE de 1200 °C.....	83
Figura 78. Espectrofotómetro portátil HACH	84
Figura 79. Balanza de Precisión ADAM.....	84
Figura 80. Potenciómetro Mettler-Toledo.....	84
Figura 81. Conductímetro Mettler-Toledo	84
Figura 82. Multímetro portátil HQ40D.....	84
Figura 83. Medidor de pH SPER SCIENTIFIC	84
Figura 84. Equilibrio de adsorción de la dureza con lechos básicos.....	85
Figura 85. Equilibrio de adsorción de los cloruros con lechos básicos.....	85
Figura 86. Equilibrio de adsorción de los sulfatos con lechos básicos	85
Figura 87. Equilibrio de adsorción de la dureza con lechos ácidos	86
Figura 88. Equilibrio de adsorción de la dureza con lechos ácidos	86

RESUMEN

La comunidad rural de La Primavera, en la provincia de Chimborazo, enfrenta serios problemas en sus sistemas de riego debido a la alta dureza del agua, la cual alcanza concentraciones de 221,67 mg/L de CaCO_3 , principalmente por la presencia de iones de calcio y magnesio. Esta dureza provoca la acumulación de minerales y la formación de depósitos en tuberías, aspersores y válvulas, generando frecuentes obstrucciones, reemplazos de equipos costosos, y una reducción en la eficiencia de la producción agrícola. El objetivo de este estudio fue diseñar un sistema de tratamiento para reducir la dureza del agua de riego, utilizando material litológico oxídico (MLO) de dos procedencias: Santa Clara, en la provincia de Pastaza, y Santa Teresa, en Chimborazo. Se diagnosticaron problemas en la infraestructura, se caracterizó el agua y se dimensionó un sistema de tratamiento basado en la adsorción de la dureza por los MLO. Las muestras de MLO fueron utilizadas tanto en su estado natural como activadas a distintos pH (2,5 y 11,5) y mezcladas (lecho mixto), se evaluaron diferentes fracciones de tamaños de partículas, para el material de Santa Clara se empleó (75-150 y <75) μm , mientras que para el de Santa Teresa se utilizaron las medidas de (250-150 y 150-75) μm , todas cortadas en dimensiones de 2 a 3 mm de largo. Los resultados mostraron que los lechos activados con NaOH pH (11,5) fueron los más efectivos, alcanzando eficiencias de reducción de dureza del 71,21 % con el MLO de Santa Clara y del 64,47 % con el de Santa Teresa, sin alcanzar la saturación. Los lechos mixtos también presentaron buen rendimiento, siendo el MLO de Santa Clara más eficiente en la retención de aniones (cloruros y sulfatos), mientras que el de Santa Teresa destacó en la remoción de dureza. En conclusión, el sistema de tratamiento propuesto ofrece una solución viable, económica y de fácil implementación para mejorar la calidad del agua de riego en La Primavera. Además, contribuye a la longevidad del equipo de riego y favorece el desarrollo agrícola de la comunidad.

Palabras Claves: Adsorción, Dureza, Material Litológico Oxídico, Propuesta, Sistema de Tratamiento.

ABSTRACT

The water in Riobamba exhibits high concentrations of calcium and magnesium ions, which are the main cause of water hardness, reaching levels exceeding 300 ppm. This leads to health issues and economic losses on an industrial and agricultural scale. Therefore, the objective of this research was to study the adsorption process of water hardness through the application of lithologic oxide material extracted from Santa Ana in Guamote canton, Chimborazo.

The methodology implemented was both practical and theoretical. Beds were made from two different particle fractions, $<75\text{ }\mu\text{m}$ and $75\text{-}150\text{ }\mu\text{m}$, by extrusion using a 20 mL syringe. Adsorption tests were carried out with both natural and chemically activated beds using diluted HCl and NaOH solutions at acidic (2.71) and alkaline pH levels (9.58 and 12.28). The study of adsorption isotherms was conducted by applying the Freundlich, Langmuir, and Temkin mathematical models, while the adsorption kinetics analysis was performed using pseudo-first-order, second order, and intraparticle diffusion equations.

The results demonstrated that the beds have a high capacity to adsorb water hardness, both in their natural and activated states. Furthermore, it was shown that the adsorption efficiency is proportional to the amount of mass used, achieving 48.52% adsorption efficiency for calcium and magnesium ions when using 1600 g of natural bed. However, when activated at pH 12.28, its adsorption efficiency increased to 74.73%, whereas at pH 2.71, its efficiency decreased to 28.53%, highlighting the effect of pH on adsorption efficiency. In the adsorption isotherm study, the data fit the Freundlich and Langmuir models, obtaining a correlation coefficient (R^2) greater than 0.80 at all pH levels. In the kinetics analysis, the values fit better with the pseudo-second-order model in tests performed at different pH levels, with a correlation coefficient (R^2) greater than 0.90.

The beds made from the lithologic oxide material from Santa Ana are an excellent alternative for the treatment of calcium and magnesium ion removal, possessing a high regeneration capacity.

Keywords: lithologic oxide material, hardness, adsorption, pH, isotherms, kinetics

Revisado por: Andrea Paola Goyes Robalino

Fecha: 05 -10-2024

Firma:



CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El recurso hídrico es fundamental para la vida, el bienestar humano y la sostenibilidad de los ecosistemas. Desempeña funciones esenciales en los ámbitos social, ambiental y económico, siendo un elemento clave en la agricultura, la industria, y la supervivencia diaria. Sin embargo, la creciente demanda de agua debido al incremento poblacional, la expansión agrícola e industrial y el cambio climático ha provocado su progresiva escasez.

A pesar de que el planeta está cubierto en su mayoría por agua, solo una pequeña fracción, menos del 3%, es apta para el consumo humano, lo que subraya la necesidad urgente de gestionar este recurso de manera racional para garantizar su disponibilidad y calidad para las generaciones futuras. Durante el ciclo hidrológico, el agua atraviesa diversas capas de suelo y formaciones geológicas, interactuando con una amplia gama de materiales orgánicos e inorgánicos. Comosolvente universal, el agua disuelve y transporta estos compuestos a lo largo de su recorrido, incorporando tanto nutrientes esenciales como sustancias potencialmente peligrosas. Entre los beneficios para la salud humana se encuentran ciertos minerales, mientras que los riesgos provienen de contaminantes como pesticidas, metales pesados y organismos patógenos que amenazan gravemente la salud pública.

Además, las características del agua, incluida su dureza, pueden tener implicaciones económicas significativas, ya que afectan la vida útil y el rendimiento de instalaciones, equipos industriales y sistemas de distribución de agua (Neira Gutiérrez, 2006).

La dureza del agua se refiere a sustancias químicas disueltas en el agua principalmente a la concentración de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), causada por el contenido de iones bivalentes disueltos, así como, Ba^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} y Sr^{2+} , aunque no en cantidades significativas, sin embargo estas reaccionan con el jabón, formando precipitados y depósitos insolubles (Prato et al., 2022).

Históricamente, las tecnologías más utilizadas para el ablandamiento del agua incluyen el intercambio iónico y el uso de agentes químicos como los carbonatos de sodio. Estos métodos, aunque eficaces, suelen ser costosos y no sostenibles para áreas rurales con recursos limitados (Prato et al., 2022; Sawyer et al., 2003). Por esta razón, se han explorado tecnologías de bajo costo y accesibles que permitan mitigar la dureza del agua en estas zonas. Entre ellas, la adsorción sobre materiales naturales como los materiales litológicos oxídicos tipo arcillas, ha ganado popularidad debido a su bajo costo, abundancia y propiedades adsorbentes.

Recientes estudios han demostrado que estos materiales, debido a su elevada superficie específica y sus características químicas, pueden actuar como excelentes adsorbentes para la remoción de iones de calcio y magnesio (Prato et al., 2021, 2022; Ortiz, Vásconez y Prato, 2019; Auquilla, Ramos y Prato, 2023; Campaña, Torres y Prato, 2024). A nivel local, la provincia de Chimborazo enfrenta graves problemas de dureza en sus fuentes de agua, lo que afecta especialmente a las zonas rurales.

En la comunidad de La Primavera, los pequeños agricultores han reportado daños frecuentes en su sistema de riego debido a la acumulación de incrustaciones minerales, lo que obliga a frecuentes reemplazos de tuberías y otros componentes del sistema. Estos problemas repercuten negativamente en la productividad agrícola y en la economía local. Diversos estudios realizados en la región han señalado la necesidad de encontrar soluciones que sean tanto técnicas como económicamente viables para enfrentar este problema (INEC, 2018). Esta investigación tiene como objetivo evaluar la técnica de adsorción para reducir la dureza del agua mediante el uso de lechos adsorbentes con compuestos naturales y activados, puesto que por consiguiente desarrollar un sistema de tratamiento eficaz y accesible que pueda ser implementado en comunidades con limitados recursos económicos, como La Primavera, donde la dureza del agua utilizada para el riego de cultivos está causando daños en el sistema de riego. Esta solución busca ser sostenible y de bajo costo, beneficiando a pequeños agricultores, optimizando el riego de sus plantíos y mejorando la seguridad en la producción de alimentos.

1.2 Planteamiento del Problema

El agua es un recurso esencial para la vida, con una demanda creciente en todas las actividades humanas. En el Ecuador, la Constitución garantiza el acceso al agua como un derecho humano fundamental (Constitución de la República del Ecuador, 2008). Sin embargo, muchas comunidades, especialmente en áreas rurales, enfrentan desafíos significativos relacionados con la calidad del agua disponible. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el acceso a agua potable es un problema global, con más de 2,2 mil millones de personas que carecen de servicios de agua gestionados de forma segura (OMS, 2019).

En varias regiones del Ecuador, el agua disponible no siempre es apta para el consumo humano, debido a su elevada dureza y a la presencia de minerales como el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^{2+}), los cuales, sin un tratamiento adecuado, pueden impactar tanto la salud humana como la infraestructura agrícola y doméstica.

En la provincia de Chimborazo, específicamente la comunidad rural La Primavera, la fuente hídrica utilizada para el riego de sus productos presenta altos contenidos de sales, particularmente de magnesio y calcio. Esta alta dureza del agua impide una distribución eficiente a través del sistema de riego, el cual es crucial para la agricultura, una de las principales actividades económicas de la región.

Estudios realizados por Sawyer et al. (2003) y World Bank (2020) evidencian que los altos niveles de dureza en el agua causan depósitos minerales que obstruyen las tuberías y deterioran los equipos, enfrentando problemas constantes debido al endurecimiento de las cañerías del sistema de riego, lo que los obliga a reemplazar el equipo con frecuencia, generando pérdidas económicas y afectando tanto la calidad como la cantidad de sus cosechas. En respuesta a esta necesidad, se han desarrollado y mejorado técnicas de adsorción e intercambio iónico, las cuales han mostrado resultados prometedores al ofrecer una depuración del agua efectiva, a menor costo y con mayor facilidad de manejo en comparación con los métodos convencionales (Prato et al.,

2024; Millán et al., 2019).

En este contexto, la adsorción sobre materiales oxídicos como la arcilla ha emergido como una solución viable (Prato et al., 2022). La adsorción es un proceso en el cual los contaminantes en el agua se adhieren a la superficie de un material, y las arcillas, con sus propiedades físicas y químicas únicas, han mostrado potencial para este fin (Babel & Kurniawan, 2003). Los materiales litológicos oxídicos - MLO (arcilla), son recursos abundantes y de bajo costo, lo que la convierte en una opción atractiva para las comunidades rurales. Investigaciones previas han demostrado que los materiales oxídicos basados en arcilla pueden ser eficaces en la eliminación de dureza del agua, con capacidades comparables a las de tecnologías comerciales más costosas (Prato et al., 2021, 2022; Campaña , Torres y Prato, 2024; Pávez, Saldaña y Prato, 2023).

El desarrollo de un sistema basado en MLO para la reducción de la dureza del agua en la comunidad de La Primavera no solo proporcionará beneficios económicos al reducir la necesidad de reemplazar equipos de riego, sino que también contribuirá a la mejora de las condiciones agrícolas y al bienestar social de la región. La implementación de tecnologías de bajo costo, como las basadas en materiales locales, está alineada con los principios de desarrollo sostenible y gestión ambiental responsable, promovidos por organismos internacionales como la FAO y la UNESCO (UNESCO, 2017). Además, estudios como los de Santos et al. (2020) han destacado que el uso de tecnologías accesibles para el tratamiento de agua en áreas rurales puede mejorar significativamente la seguridad hídrica y la productividad agrícola.

1.3 Justificación

La necesidad de desarrollar un sistema eficaz, de bajo costo y accesible para la reducción de la dureza del agua es evidente, especialmente en comunidades rurales como La Primavera, donde la agricultura depende en gran medida de la disponibilidad y calidad del agua. La implementación de técnicas convencionales de tratamiento de agua, como el intercambio iónico, resulta costosa y compleja, requiriendo infraestructura avanzada y mantenimiento continuo, lo que está fuera del alcance de las economías rurales.

El uso de materiales oxídicos tipo arcilla para la reducción de la dureza del agua se presenta como una solución prometedora y accesible. La arcilla, un material natural y abundante en la región, tiene la capacidad de adsorber iones de calcio y magnesio, disminuyendo significativamente la dureza del agua (Millán et al., 2009; Prato et al., 2022; Babel & Kurniawan, 2003).

Este tipo de solución no solo es económica, sino que también puede ser implementada localmente con una mínima dependencia de tecnología externa, lo que asegura su sostenibilidad a largo plazo. Además, este estudio contribuirá al desarrollo de conocimientos científicos y técnicos sobre el uso de materiales naturales para el tratamiento del agua, proporcionando una base para futuras investigaciones. La innovación en el diseño de lechos adsorbentes basados en arcillas no solo beneficiará a las comunidades rurales de Chimborazo, sino que podría ser replicable en otras áreas con problemas similares de dureza en el agua. Al mejorar la calidad del

agua, se asegura una mayor eficiencia en los sistemas de riego, incrementando la productividad agrícola y mejorando las condiciones socioeconómicas de la comunidad. Por último, la investigación se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, específicamente con el ODS 6, que busca garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible (UNESCO, 2017). Al desarrollar tecnologías accesibles y sostenibles, se fortalece la capacidad de las comunidades rurales para gestionar sus recursos hídricos de manera efectiva, contribuyendo al bienestar ambiental y social.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Diseñar un sistema de tratamiento para las aguas de regadío de la comunidad La Primavera.

1.4.2 Específicos

- Diagnosticar la problemática existente en la infraestructura del sistema de riego de la comunidad La Primavera.
- Caracterizar fisicoquímicamente las aguas de riego de la comunidad La Primavera, para determinar las causas de afectaciones al sistema.
- Dimensionar y diseñar un sistema de tratamiento de las aguas de regadío de la comunidad La Primavera.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

El tratamiento de aguas duras en sistemas de riego es un proceso fundamental que busca reducir la concentración de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), los principales causantes de la dureza del agua. Estos iones pueden generar diversos problemas, como la formación de depósitos de cal en tuberías, lo que interfiere con la eficiencia del sistema de riego y puede causar obstrucciones en las válvulas y aspersores, afectando así la distribución del agua, la producción de alimentos agrícolas y aumentando los costos de mantenimiento.

Por lo tanto, es crucial analizar la calidad del agua para determinar la concentración de estos iones y diseñar un tratamiento adecuado que se adapte a las necesidades del sistema de riego y a las limitaciones económicas. El uso de lechos de arcilla como material adsorbente se ha convertido en una alternativa viable y sostenible, que con su alta capacidad de intercambio iónico y su superficie específica amplia, permiten la adsorción de los iones responsables de la dureza del agua, reduciendo así su concentración y mejorando la calidad del agua utilizada en riego.

2.1 Generalidades del Agua

El agua es un recurso esencial para la vida y el desarrollo de actividades biológicas, industriales y domésticas. Su disponibilidad y calidad son aspectos críticos, especialmente en un contexto global marcado por el cambio climático y la creciente demanda de recursos hídricos (Neira Gutiérrez, 2006).

Entender las propiedades del agua, su distribución geográfica y los desafíos relacionados con su gestión sostenible es crucial para la implementación de estrategias efectivas de conservación y uso racional.

2.2 Tipos de Agua

El agua en forma general se la puede clasificar en:

- **Agua cruda:** Es el agua que se encuentra en la naturaleza y que no ha recibido ningún tratamiento para modificar sus características: físicas, químicas o microbiológicas (INEN, 2020).
- **Agua potable o tratada:** Es el agua cuyas características físicas, químicas microbiológicas han sido tratadas con el fin de garantizar su aptitud para consumo humano (INEN, 2020).
- **Aguas residuales:** Son los líquidos de composición variada provenientes de uso municipal, industrial, comercial, agrícola, pecuario o de otra índole, ya sea pública o privada y que por tal motivo haya sufrido degradación en su calidad original (Ministerio del Ambiente, 2015).
- **Agua subterránea:** Es toda agua del subsuelo, especialmente la que se encuentra en la zona de saturación se sitúa debajo del nivel freático donde todos los espacios abiertos están llenos con agua a una presión igual o mayor que la atmosférica (Ministerio del Ambiente, 2015).

- **Aguas superficiales:** Incluyen ríos, arroyos, lagos, lagunas, estanques y océanos. Estos cuerpos de agua juegan un papel crucial en el ciclo hidrológico y son fuentes primarias para diversos usos, incluyendo el riego (Ministerio del Ambiente, 2015).
- **Aguas atmosféricas:** Se refiere a la precipitación en forma de lluvia, nieve, granizo, que es una fuente importante de recarga para las aguas superficiales y subterráneas (Fuentes, 2017).

2.3 Métodos de Riego

El agua es un recurso esencial para los procesos fisiológicos de todos los seres vivos, desempeñando un rol vital en la estructura biológica y en las funciones de los organismos, incluyendo a los humanos. Además de su importancia en el consumo, el agua es fundamental en la agricultura, donde se utiliza para cultivar alimentos y crear valor en la interacción del hombre con la naturaleza (Jiménez, 2012).

La agricultura de regadío es una práctica donde el agua se aplica de forma controlada para garantizar la productividad de los cultivos. Esto implica el uso de diversas técnicas de riego, como canales, acequias y aspersores, que requieren tanto inversiones significativas como un desarrollo técnico avanzado. La elección del método de riego adecuado (Tabla 1) depende de factores como la topografía del terreno, el tipo de cultivo, la disponibilidad de agua y los costos, y tiene un impacto directo en la eficiencia y sostenibilidad de la producción agrícola (Jiménez, 2012).

Tabla 1. Clasificación de los métodos de riego

Tipo de riego	Técnica
Riego por Superficie	a) Tendido
	b) Surco
	c) Melga
Riego Presurizado	a) Goteo
	b) Microaspersión
	c) Aspersión

Fuente: (Demin, 2014)

2.4 Clasificación de los Tipos de Riego

2.4.1 Riego por superficie

Este método de riego es económico y no requiere energía externa, lo que lo hace accesible en muchas zonas agrícolas. Aunque puede haber pérdidas significativas de agua por infiltración, su eficiencia mejora con una buena planificación. Las modalidades incluyen riego por surco, melga y tendido, siendo este último el menos eficiente debido a su alto desperdicio de agua (Demin, 2014).

- **Riego tendido:** Un método antiguo y menos eficiente, donde la distribución del agua es desigual, generando excesos y déficits en distintas áreas. Para mejorar su eficacia, se recomienda que el agua avance lentamente, siguiendo las curvas de nivel y manteniendo una pendiente mínima (Demin, 2014).
- **Riego por surcos:** El agua fluye por pequeños canales o surcos desde un punto elevado a otro más bajo, utilizando la gravedad, como podemos observar en la Figura 1. Este riego es adecuado para cultivos que requieren una distribución de agua más controlada.



Figura 1. *Riego por surcos adaptada a cultivos sembrados en línea*

Fuente: (Demin, 2014)

- **Riego por melgas:** En la Figura 2, se puede apreciar una representación del riego por melgas, el cual consiste en el desplazamiento del agua a través de franjas de tierra delimitadas por bordos, útil para regar pasturas, cereales y frutales. Sus desventajas incluyen la necesidad de grandes cantidades de agua y un terreno bien nivelado para evitar problemas de distribución (Demin, 2014).



Figura 2. *Riego por melgas a modo de franjas*

Fuente: (Demin, 2014)

2.4.2 Riego presurizado

Este sistema utiliza tuberías que transportan agua a una presión controlada directamente a las plantas. Al evitar pérdidas por infiltración en la conducción y distribución, maximiza la disponibilidad de agua para las plantas (Demin, 2014).

- **Riego por goteo:** Se aplica el agua en pequeñas gotas directamente cerca de la planta, mojando solo un 30% del suelo como se muestra en la Figura 3. Es un método de alta frecuencia que requiere reponer el agua consumida por la planta en uno o dos días, formando un bulbo húmedo en el suelo donde se desarrollan más raíces (Demin, 2014).



Figura 3. Riego por goteo donde se forma un bulbo húmedo debajo de cada goteo

Fuente: (Demin, 2014)

- **Riego por microaspersión:** Este método utiliza gotas muy pequeñas de agua aplicadas a baja presión (1,6 kg/cm²), creando un diámetro de mojado de 3 - 4 metros. En la Figura 4, se puede observar lo ideal que es este método para frutales, viveros y algunas hortalizas, utilizando micro aspersores que pueden ser clavados en el suelo o suspendidos por encima de las plantas (Demin, 2014).



Figura 4. Riego por microaspersión con un soporte clavado al suelo

Fuente: (Demin, 2014)

- **Riego por aspersión:** Distribuye agua en forma de lluvia sobre el suelo, transportada por tuberías a presión como se observa en la Figura 5. Este riego requiere de alta presión para cubrir gran parte del suelo, aunque puede tener pérdidas por evaporación. Se usan aspersores de diferentes tipos, asegurando que la velocidad de aplicación sea igual o menor a la infiltración del suelo para evitar escorrentíos (Demin, 2014).



Figura 5. Técnica de aspersión con un sistema elevada por presión

Fuente: (Demin, 2014)

2.5 Contaminación del Agua

La contaminación del agua ocurre cuando su calidad natural se deteriora, haciéndola parcial o totalmente inadecuada para su uso. Esta contaminación puede ser puntual, afectando un área específica, o difusa, extendiéndose a zonas más amplias, como un acuífero bajo áreas de cultivo

con exceso de nitrógeno. Puede ser de origen natural, como por erosión o actividad volcánica, o causada por actividades humanas, como descargas de aguas residuales o uso de pesticidas (Fuentes, 2017).

Las fuentes que originan las causas de la contaminación pueden clasificarse en grupos:

- **Contaminación Doméstica y Urbana:** Proviene de residuos sólidos y líquidos de origen doméstico y urbano, que son lixiviados por la lluvia en vertederos o liberados en cuerpos de agua a través del alcantarillado, con o sin tratamiento previo (Fuentes, 2017).
- **Contaminación Agrícola y Ganadera:** Es una de las fuentes más comunes de contaminación de acuíferos, causada por fertilizantes, pesticidas, riego, y vertidos de estiércol, que alteran la calidad del agua subterránea (Fuentes, 2017).
- **Contaminación Industrial y Minera:** Varía según el tipo de industria o actividad minera, incluyendo vertidos de residuos sólidos y líquidos, lixiviación de escombreras, y residuos radiactivos, que requieren un manejo cuidadoso por su peligrosidad (Fuentes, 2017).
- **Contaminación por Intrusión Marina:** Ocurre en acuíferos costeros cuando el agua salada, más densa, se infiltra por debajo del agua dulce, creando una interfase con salinidad mixta y afectando la calidad del agua dulce (Fuentes, 2017).

2.6 Dureza del Agua

La dureza del agua se define como la concentración total de cationes multivalentes disueltos, especialmente calcio y magnesio, que provienen de la disolución de rocas y minerales. Su valor suele calcularse sumando las concentraciones de estos dos iones, químicamente expresada como: $\text{Dureza} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$. Esta dureza se expresa comúnmente en miligramos por litro (mg/L) como carbonato de calcio (CaCO_3), lo que permite una comparación directa con la masa equivalente de CaCO_3 que tendría la misma cantidad de iones. Un indicador evidente de la dureza es la precipitación de sales insolubles cuando el agua se combina con jabón (Fernández Cirelli, 2017).

2.6.1 Tipos de Dureza del Agua

Existen varios tipos de dureza en el agua:

Dureza Total: Refleja la cantidad total de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua.

- **Dureza Carbonatada o Temporal:** Se debe a la presencia de carbonatos e hidrógeno carbonatos de calcio y magnesio, que pueden ser eliminados por calentamiento, lo que provoca su precipitación.
- **Dureza No Carbonatada o Permanente:** Proviene de sales como cloruros, sulfatos y nitratos de calcio y magnesio, las cuales no se eliminan por ebullición y pueden causar incrustaciones en tuberías y equipos.

Aunque la dureza es uno de los factores que contribuyen a la conductividad del agua, otros iones también pueden influir en este aspecto. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), las aguas duras pueden provocar incrustaciones en los sistemas de distribución, mientras que las aguas blandas pueden tener un efecto corrosivo en ellos (Solís-Castro et al., 2018).

Estudios epidemiológicos han encontrado que el agua dura puede ofrecer cierta protección contra enfermedades cardiovasculares. Por ejemplo, en la "Zona Azul" de la Península de Nicoya, en Costa Rica, se ha observado una relación entre la dureza del agua y la longevidad de la población. Sin embargo, otros estudios han identificado una correlación entre el consumo de aguas muy duras y una mayor prevalencia de litiasis renal en diversas poblaciones a nivel mundial (Solís-Castro et al., 2018).

El grado de dureza del agua se refiere a la cantidad total de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) presentes, calculada en términos equivalentes a carbonato de calcio (CaCO_3) y comúnmente expresada en miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm).

2.6.2 Clasificación de Aguas con Dureza

Según el valor de su concentración (Tabla 2), las aguas pueden clasificarse en:

Tabla 2. Clasificación de aguas con dureza

Tipo de agua	Concentración de dureza (mg/L) de CaCO_3
Aguas Blandas	Menos de 60
Aguas Ligeramente Duras	Entre 60 y 120
Aguas Moderadamente Duras	Entre 120 y 180
Aguas Duras	Más de 180

Fuente: (Solís-Castro et al., 2018)

El agua dura, se caracteriza por generar depósitos de carbonato de calcio, conocidos como sarro, que se acumulan en tuberías y electrodomésticos, así mismo, la presencia de estos minerales reduce la capacidad de los jabones y detergentes para formar espuma, lo que incrementa su consumo. Sin embargo, desde una perspectiva nutricional, el agua dura también puede ser una fuente significativa de calcio y magnesio en la dieta humana, aportando beneficios potenciales para la salud.

2.7 Adsorción y su Aplicación en el Tratamiento de Aguas Duras

La adsorción es un proceso fundamental en el tratamiento de agua para consumo humano, empleado para eliminar compuestos químicos orgánicos responsables de sabores, olores y coloraciones indeseables, por la presencia de compuestos orgánicos de origen natural y sintético, así como subproductos de desinfección. Este proceso también es crucial para remover

contaminantes inorgánicos peligrosos, como percloratos, arsénico y metales pesados (Luján Esparza, 2015).

La adsorción se basa en una transferencia de masa en la que el adsorbato, presente en una fase líquida o gaseosa, es atraído y acumulado en la superficie de un sólido conocido como adsorbente. Durante el proceso, las especies disueltas en el efluente son transportadas al interior del adsorbente sólido granular por difusión, donde son finalmente retenidas en la superficie interna del adsorbente a través de mecanismos de adsorción física o química (Luján Esparza, 2015).

2.7.1 Tipos de Adsorción

La adsorción se clasifica en dos tipos principales dependiendo del tipo de interacción entre el adsorbato y la superficie del adsorbente:

- **Adsorción física:** Es un proceso reversible que se produce a bajas temperaturas y se caracteriza por la presencia de fuerzas intermoleculares débiles del tipo Van der Waals entre las moléculas del adsorbato y los complejos de la superficie del adsorbente. Este tipo de adsorción es exotérmica y tiene un calor de adsorción comparable al calor latente de condensación, permitiendo que las moléculas se muevan libremente en la interfase sin formar enlaces específicos (Calvo, 2017).
- **Adsorción química:** Implica una interacción más intensa, con la formación de enlaces químicos entre los sitios activos específicos de la superficie del adsorbente y las moléculas del adsorbato. Este proceso es generalmente irreversible, se produce a altas temperaturas ($> 200^{\circ}\text{C}$), y tiene un calor de adsorción con una elevada energía de activación (10-100 kcal/g-mol), similar al de una reacción química (Calvo, 2017).

2.7.2 Equilibrio de Adsorción

El equilibrio de adsorción se alcanza cuando la velocidad de adsorción de las moléculas en la superficie del adsorbente es igual a la velocidad de desorción de estas (Figura 6).

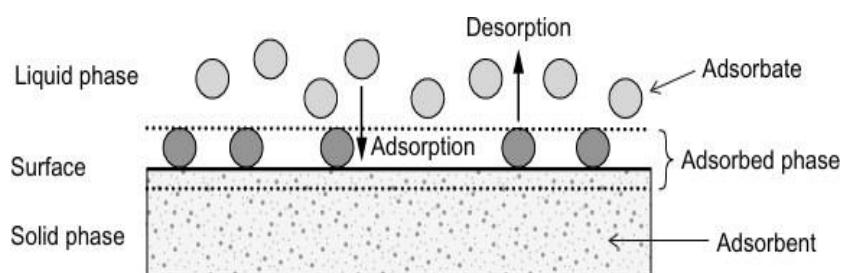


Figura 6. Términos básicos de adsorción
Fuente: (Worch, 2012)

Este equilibrio es crucial para determinar la capacidad máxima de adsorción de un adsorbente a una concentración específica de soluto. Las isotermas de adsorción, que son representaciones gráficas de este equilibrio, se construyen mediante ecuaciones que relacionan la cantidad de soluto adsorbido en el sólido con la concentración de soluto en solución a una temperatura constante. Estas isotermas son herramientas esenciales en el diseño y optimización de procesos de adsorción en el tratamiento de agua (Calvo, 2017).

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de Investigación

El presente trabajo investigativo se apoyó en la experimentación y obtención de datos, implementando diversas estrategias empleadas para su desarrollo, como observaciones y mediciones obtenidas a partir de muestras recolectadas en la comunidad “La Primavera”, argumentando así que fue de campo. De acuerdo con Navarrete (2004) “la investigación de campo es parte de la experiencia concreta de la forma más libre y rica, la cual trata de obtener toda la información posible desde diferentes ángulos, fuentes e instrumentos”.

La información tiene que justificar la realidad estudiada, para poder dimensionar un sistema de tratamiento acorde para la retención de iones y cationes disueltas en el agua, experimentando y describiendo el proceso del diseño. Por lo que esta investigación tiene un proceso de carácter descriptivo, ya que como menciona Gay (1996) “La investigación descriptiva, comprende la colección de datos para probar hipótesis o responder a preguntas concernientes a la situación corriente de los sujetos del estudio”.

Esta investigación reside en el desarrollo de un lecho adsorbente capaz de retener iones disueltos en el agua (dureza, cloruros, nitratos, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos), con altos grados de dureza; específicamente en las muestras de agua analizadas, así mismo demostrar la capacidad de retención catiónica y aniónica.

3.2 Diseño de la Investigación

Esta investigación tiene un diseño experimental y documental, pues reside en la caracterización del material litológico obtenido, análisis de sus propiedades fisicoquímicas y determinación de la capacidad de adsorción iones disueltas en el agua una vez preparado el sistema de retención.

Al realizar un estudio es esencial definir el diseño de investigación, optando por la más adecuada para fundamentar la información en base científica, sólida y generalmente aceptable. El diseño de la investigación es la planificación meticulosa que permite justificar las conclusiones al eliminar explicaciones alternativas y controlar fuentes de varianza, con el objetivo de proporcionar respuestas claras a las preguntas del investigador (Morales Vallejo, 2013).

3.3 Población y Muestra

3.3.1 Población

En el contexto de un estudio, el término "población de estudio" no se limita exclusivamente a seres humanos; también puede incluir animales, muestras biológicas, expedientes, instalaciones, objetos, familias u organizaciones. La población de estudio se define como un conjunto específico, delimitado y accesible de casos, que servirá como referencia para la selección de la

muestra, cumpliendo con una serie de criterios preestablecidos (Arias Gómez et al., 2021).

En este estudio, la población de interés está compuesta de materiales litológicos oxídicos del país, específicamente, se tomaron dos materiales que fueron sometidos a una evaluación detallada bajo parámetros previamente establecidos, con el objetivo de determinar su capacidad de retención de iones disueltos en el agua. Las muestras fueron extraídas de SantaClara en la provincia de Pastaza y de Santa Teresa de la provincia de Chimborazo.

3.3.2 Muestra

Un subconjunto de la población, conocido como muestra, es seleccionado de una población más amplia con el propósito de realizar un estudio. Esto permite extraer conclusiones sobre la totalidad de la población sin la necesidad de recolectar datos de cada uno de sus integrantes (González et al., 2012).

En esta investigación, se experimentó con dos tipos de materiales litológicos oxídicos. Para cada tipo de material, se utilizaron 33 kg de arcilla, la cual fue posteriormente clasificada para su análisis.

3.4 Técnicas e Instrumentos

Existe una gran variedad de herramientas que son utilizadas para la recopilación de datos y que se pueden utilizar en una investigación, a continuación, se describen las técnicas y los instrumentos empleados para las mediciones y análisis de la calidad del agua siguiendo los estándares establecidos por el INEN (INEN, 1998).

En esta investigación se emplearon diversas técnicas e instrumentos para garantizar un análisis exhaustivo y preciso de los materiales litológicos y del agua utilizada en el sistema de riego. La observación directa fue una técnica utilizada, la cual permitió identificar visualmente los problemas asociados a la dureza del agua en los componentes del sistema de riego, como la precipitación de sales en aspersores y tuberías. Además, se utilizó un GPS para localizar con precisión los puntos de muestreo, facilitando la recolección de datos en el sitio y asegurando la consistencia en las visitas de campo.

En el laboratorio, se implementaron instrumentos de precisión para llevar a cabo la medición de los experimentos, permitiendo obtener datos exactos sobre la capacidad de retención de los materiales litológicos y los niveles de dureza del agua. Para analizar los resultados y organizar la información recolectada, se utilizó una computadora con programas especializados en procesamiento de datos. Así mismo, los equipos de laboratorio complementaron las pruebas, asegurando el control de variables y la replicabilidad de los experimentos realizados.

3.5 Metodología

Para la elaboración de los objetivos propuestos en esta investigación se coordinaron las acciones en fases secuenciales, cada una de las cuales comprende funciones con objetivos específicos e interrelacionados. Por lo cual fue fundamental cumplir con un proceso estructurado de cuatro fases, las cuales se detallan a continuación:

3.6 Fase I. Diagnóstico de la Problemática

Para abordar la problemática que afecta al sistema de riego de la comunidad La Primavera, se llevaron a cabo tres visitas que se utilizaron para la recolección de muestras de agua y para la socialización con la población de la comunidad (Figura 7), para poder entender de mejor manera cual es el problema existente.



Figura 7. Reunión con moradores de la comunidad La Primavera

Fuente: Autores

Durante cada visita, se tomó especial atención en observar las condiciones del sistema de riego para la identificación del problema (Figura 8), a su vez se midieron algunos parámetros in situ para su comparación en las pruebas de laboratorio.



Figura 8. Observación del sistema de riego y medición de parámetros del agua

Fuente: Autores

3.7 Fase II. Caracterización de las Aguas de Riego

El proceso de análisis realizado en el laboratorio se describe a continuación:

3.7.1 Muestreo de Agua

Se recolectaron las muestras de agua de la quebrada El Cedro, la cual es la fuente que alimenta el sistema de riego usado por la comunidad. Se realizó un muestreo simple en recipientes plásticos de 20 y 35 L en cada visita realizada (Figura 9), sumando un total de 340 litros.



Figura 9. Recipientes utilizados para la recolección de agua

Fuente: Autores

Las muestras de agua recolectadas fueron trasladadas hasta el laboratorio de Servicios Ambientales de la Facultad de Ingeniería de la UNACH (Figura 10), donde fueron valoradas y analizadas en distintos parámetros de calidad de agua como pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza, y la presencia de sulfatos, fosfatos, cloruros, carbonatos y bicarbonatos. Estos análisis fisicoquímicos fueron fundamentales para entender la composición del agua y su impacto en el sistema de riego.



Figura 10. Laboratorio de Servicios Ambientales, UNACH

Fuente: Autores

En la Tabla 3 se detallan los métodos de medición y los equipos utilizados durante el análisis fisicoquímico del agua de riego empleada por la comunidad La Primavera para sus labores agrícolas.

Tabla 3. Tabla de parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Método de Medición	Equipo	Unidades
pH	Potenciometría (4500 H ⁺ B)	Potenciómetro (Mettler-Toledo, Seven CompactTM pH/Ion S220)	Unidades de pH
Conductividad eléctrica	Conductimetría (2510-B)	Conductímetro (Mettler-Toledo, Seven CompactTM Conductivity S230)	µS/cm (micro siemens por centímetro)
Alcalinidad	Valoración ácido-base (2340-C)	Bureta y solución de ácido clorhídrico (HCl)	mg/L (como CaCO ₃)
Dureza	Valoración - Complejometría (2320-B)	Bureta, EDTA e indicador Eriochrome Black T	mg/L (como CaCO ₃)
Fosfatos	Espectrofotometría (4500-N-E)	Espectrofotómetro (HACH, 49300-60 DR/2010, Portable Datalogging Spectrophotometer)	mg/L (PO ₄ ³⁻)
Cloruros	Titulación argentometría (Método de Mohr - 4500 Cl- B)	Bureta, nitrato de plata (AgNO ₃)	mg/L (como Cl ⁻)
Carbonatos	Valoración ácido-base	Bureta y ácido clorhídrico (HCl)	mg/L (como CO ₃ ²⁻)
Bicarbonatos	Valoración ácido-base	Bureta y ácido clorhídrico (HCl)	mg/L (como HCO ₃ ⁻)
Sulfatos	Espectrofotometría (4500)	Espectrofotómetro	mg/L (como SO ₄ ²⁻)

Fuente: Autores, adaptado de Rice, Baird, Eaton (2017)

En la medición del pH del agua, se empleó la técnica y equipo detallado en la Tabla 3, que permitió determinar el grado de acidez o alcalinidad del agua mediante la medición del potencial eléctrico generado por un electrodo sensible a los iones de hidrógeno. En cuanto a la conductividad eléctrica, se utilizó el conductímetro (Tabla 3) para medir la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, proporcionando una idea de la cantidad de sales disueltas en el agua, lo que es crítico para evaluar su impacto en los sistemas de riego, los equipos se muestran en la Figura 11.



Figura 11. *Medidores de pH y conductividad eléctrica*

Fuente: Autores

Para determinar la alcalinidad y la dureza, se realizaron con métodos de valoraciones respectivamente detalladas en la Tabla 3, empleando buretas y soluciones titulantes. Por otro lado, los cloruros fueron medidos mediante la titulación argentométrica (Método de Mohr), que involucra la adición de nitrato de plata (AgNO_3), mientras que los carbonatos y bicarbonatos se determinaron mediante valoraciones ácido-base con bureta y ácido clorhídrico (HCl), expresando ambos resultados en mg/L según su forma química.



Figura 12. *Instrumentos de precisión*

Fuente: Autores

La cuantificación de fosfatos y sulfatos se llevó a cabo mediante espectrofotometría, que mide la absorbancia de las muestras, permitiendo determinar las concentraciones de estos iones como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. *Espectrofotómetro UV/Visible*

Fuente: Autores

Los equipos fueron calibrados antes de cada sesión de análisis y se realizaron las mediciones por

duplicado, para verificar la repetitividad de los resultados, todos los datos obtenidos durante el proceso de muestreo y análisis se registraron de manera sistemática en libretas y en una base de datos diseñadas para facilitar su análisis posterior. De igual forma se elaboró un informe detallado el que contenía tablas y gráficos de concentración de la dureza y otros iones distribuidos en el agua, los cuales sirvieron como base para la formulación del sistema de tratamiento.

3.8 Fase III. Pruebas de Adsorción

3.8.1 Etapa I: Preparación de los Lechos de Adsorción a partir de los Materiales Litológicos Oxídicos

a) Recolección de los materiales

La recolección de los materiales litológicos oxídicos (MLO) se realizó en dos zonas, en Santa Clara, provincia de Pastaza y en Santa Teresa, provincia de Chimborazo (Figura 14), donde se implementó el uso de un GPS con el sistema de referencia WGS84, Proyección UTM- Zona 17S y 18S, que permitió ubicar con exactitud las coordenadas de los materiales (Tabla 4).

Tabla 4. Coordenadas de recolección del material litológico Santa Clara, Santa Teresa

	Coordenadas X	Coordenadas Y
Punto 1	178897,671	9854910,649
Punto 2	749675,5075	9781180,485

Fuente: Autores

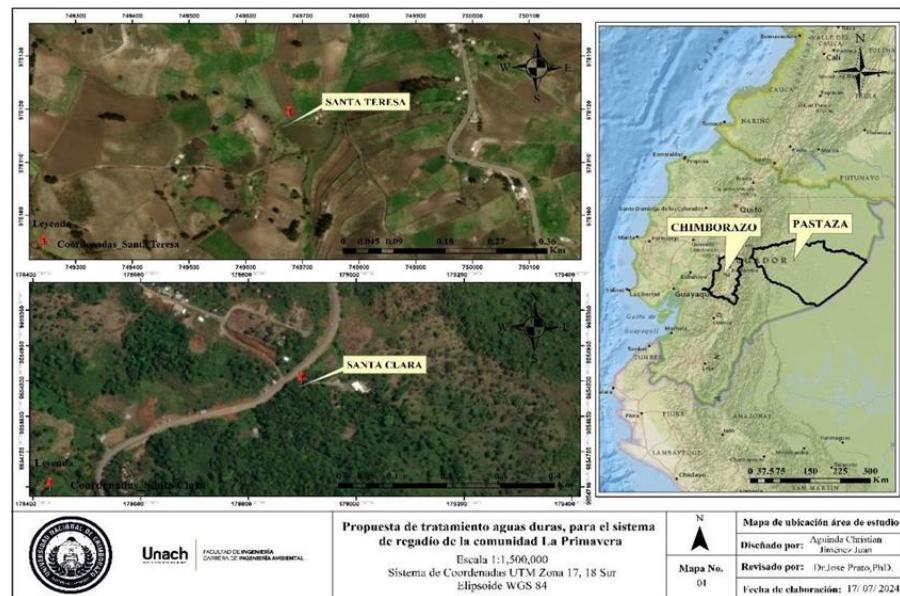


Figura 14. Mapa de ubicación del material litológico

Fuente: Autores

Una vez ubicadas las dos zonas de recolección, se procedió a la toma de muestras de suelos con la ayuda de palas (Figura 15), se recogió el material en sacos, para posteriormente ser trasladadas a las instalaciones de la UNACH para su respectiva preparación.



Figura 15. Recolección de las arcillas

Fuente: Autores

b) Preparación de los Lechos

1. **Secado del material:** Con el material litológico recolectado, se procedió a dispersarlo por el suelo al aire atmosférico y realizar un secado por tres días (Figura 16), cada cierto tiempo se removía el material para un mejor secado y se desmenuzaba evitando una excesiva aglomeración.



Figura 16. Secado del material

Fuente: Autores

2. **Fraccionamiento y tamizado del material:** Con los MLO secados y con la ayuda de un martillo de goma, se golpea de forma controlada y con intensión de triturar el material en pequeñas partes. A continuación, se empleó una técnica de cernido y se fraccionó el material por medio de tamices en tres distintos tamaños de $250 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$ y $<75 \mu\text{m}$. Para este proceso se usó un equipo de vibración automática (BIOBASE modelo BK-TS200), el cual agitó cerca de 5 minutos cada carga hasta obtener el material clasificado (Figura 17).

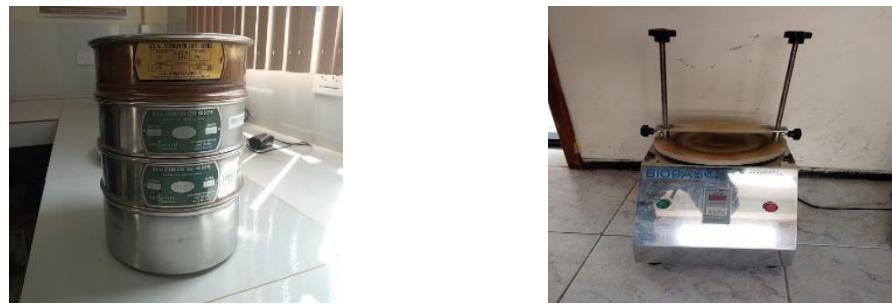


Figura 17. Tamizador automático y tamices

Fuente: Autores

3. **Fabricación del lecho:** Con el material tamizado y clasificado se preparó una pasta del material litológico oxídico (Figura 18), para ello, se mezcló el MLO con agua hasta obtener una masa de firmeza suave y moldeable.



Figura 18. Pasta de arcilla

Fuente: Autores

4. **Corte del lecho:** Se introdujo la pasta del lecho en una jeringa de 20 mL, con una salida de aproximadamente 3 mm de diámetro y sobre un papel periódico se realizaron tiras cilíndricas por extrusión, y se cortaron manualmente en trozos de un largo promedio de 0,3 a 0,5 mm (Figura 19).



Figura 19. Tiras de lecho y cortes de lechos

Fuente: Autores

5. **Secado y calcinado de los lechos:** Se introdujeron los lechos secos en crisoles, y empleando una mufla (Thermolyne FB1410M, Thermo Scientific), se trajeron a 800 °C por un período de 4 horas (Figura 20).



Figura 20. *Mufla de calcinación*

Fuente: Autores

6. Obtención del lecho: Pasado el tiempo de calcinación y enfriado de la mufla se retiraron los crisoles y se almacenaron los lechos en tarrinas de plásticos, ahora tienen una consistencia más sólida y estable, favorables para las pruebas de adsorción (Figura 21).



Figura 21. *Lechos calcinados*

Fuente: Autores

3.8.2 Etapa II. Pruebas de Equilibrio de Adsorción

Las pruebas de equilibrio de adsorción fueron estudiadas en dos fases: lechos naturales y lechos activados. El objetivo principal de estas pruebas fue evaluar la eficacia de los materiales litológicos oxídicos (MLO) como agentes adsorbentes, analizando su capacidad para retener iones disueltos. Para ello, se realizaron pruebas de dureza, cloruros y sulfatos en las muestras obtenidas de cada fase.

• Lechos Naturales

En esta prueba se utilizó MLO sin ningún tipo de tratamiento previo, es decir, en su estado natural. El objetivo fue analizar la capacidad de adsorción de los lechos, evaluando la cantidad de iones disueltos en el agua retenidos por estos a lo largo del tiempo de equilibrio para diferentes fracciones de los materiales. Se midió la eficacia de los lechos de arcilla en siete intervalos de tiempo predefinidos (30, 60, 120, 180, 1440, 2880 y 4320 minutos) y con tres tamaños de partículas distintos: 150-250 μm , 75-150 μm y menores a 75 μm . Esta prueba fue realizada para ambos tipos de MLO estudiados, correspondientes a las localidades de Santa Clara y Santa Teresa.

Los ensayos se llevaron a cabo en recipientes de plástico previamente clasificados y etiquetados según el tipo de lecho y la fracción de partícula (Figura 22). En cada envase, se colocaron 7 g de lecho de arcilla y se añadieron 150 mL de agua de riego. Posteriormente, las muestras fueron

agitadas y dejadas en reposo durante los tiempos especificados.



Figura 22. Pesado de arcilla

Fuente: Autores

Este procedimiento permitió evaluar la interacción entre los lechos y el agua en condiciones controladas, proporcionando datos clave sobre la eficiencia de adsorción de los materiales en función del tamaño de partícula y el tiempo de contacto.

- **Lechos Activados**

En el segundo análisis, los MLO fueron activados a dos valores de pH, 2,5 y 11,5, mediante el uso de soluciones diluidas de NaOH para alcanzar un pH de 11,5 y de HCl para un pH de 2,5. El proceso de activación consistió en verter la solución activadora sobre los lechos en recipientes previamente preparados, permitiendo que la mezcla reposara durante 24 horas para asegurar la completa interacción entre la solución y el lecho.

Una vez finalizado el tiempo de reposo, se retiró la solución activadora y se midió el pH residual de los lechos para confirmar que las condiciones de activación no habían cambiado. Este control es crucial para garantizar la estabilidad del pH durante el proceso de activación, posteriormente, se procedió con el mismo protocolo descrito en la fase neutra, repitiendo los ensayos para evaluar el comportamiento de los lechos en las nuevas condiciones de pH.

3.8.3 Etapa III. Pruebas en Columnas

Las pruebas en columnas simulan condiciones de flujo continuo similares a las de un sistema de tratamiento lo que permite analizar cómo se comportan los lechos adsorbentes a lo largo del tiempo, en condiciones controladas de flujo y contacto prolongado con el agua. Esto permite evaluar la eficiencia de los materiales en condiciones de operación real, optimizar el diseño de los sistemas y prever su rendimiento a escala más grande.

- **Sistema de Adsorción**

El sistema de adsorción está compuesto de dos columnas de material PVC (Figura 23) con medidas de longitud de 59 cm y diámetro de 13 cm, las cuales están encajadas a una tabla triple que sirve como soporte y mide 100 cm de largo por 68 cm de ancho, en la parte inferior tiene unido un grifo para el pase del caudal.



Figura 23. Sistema de filtración
Fuente: Autores

Para el sistema de flujo, existe una manguera conectada a un recipiente de plástico rectangular de 6 litros, y por medio de una llave manual se ajusta el flujo de ingreso a la columna por gravedad. De la misma forma en la salida de la columna se encuentra un grifo para el control del flujo, en los experimentos se fijó un caudal de trabajo de 1,1 mL/s, el cual se mantuvo constante y controlado para poder tomar muestras por intervalos de volumen tratado.

En cada columna se colocaron 6 bolsas del material adsorbente (Figura 24) cada una con un peso de 250 gramos, que dio como resultado 1500 gramos de lecho, estas condiciones se cumplieron para todas las pruebas.



Figura 24. Bolsas de lecho de 250g
Fuente: Autores

- **Pruebas con Lechos Naturales**

Los experimentos involucraron el uso de columnas empacadas con los materiales adsorbentes (MLO), que no han sido sometidos a ningún proceso de activación química, es decir, de forma natural, el agua de riego se hizo pasar a través de la columna a un caudal controlado. Durante este proceso, se recolectaron muestras de agua tratada en 19 intervalos de volumen para un total de 12 litros por columna. Al final de cada ensayo se analizaron las muestras de agua midiendo la concentración final de la dureza total, los cloruros y los sulfatos.

- **Pruebas con Lechos Activados (Base y Ácido)**

La activación del lecho como ya se mencionó es un proceso químico que implica el tratamiento

del MLO con soluciones diluidas de HCl y NaOH, con el objetivo de ajustar la carga superficial del material adsorbente, y evaluar el efecto sobre su capacidad de retención iónica.

Para la activación en base, se usó una solución diluida con un pH de 11,5 mientras que para la activación en medio ácido se empleó una solución con un pH de 2,5 (Figura 25). Los experimentos de activación se realizaron para cada material empleando las mismas condiciones de las pruebas de adsorción con el lecho natural, al final se midió la concentración de los iones H^+ (medio ácido) y OH^- (medio alcalino) por valoración titulométrica utilizando como indicador fenolftaleína.



Figura 25. Solución diluida

Fuente: Autores

Una vez el material alcanzo su punto de activación, ya sea básico o ácido, se lavó el medio adsorbente en la columna con agua destilada para eliminar el exceso de solución activante. Luego se procedió a realizar las pruebas de adsorción usando las mismas condiciones experimentales antes descritas para los ensayos con lechos naturales (Figura 26).



Figura 26. Análisis de los iones en el agua durante las pruebas de adsorción en columna

Fuente: Autores

Con la ayuda del software Excel, se analizaron los datos en tablas y figuras, graficando la concentración del contaminante contra el volumen de agua tratado, permitiendo interpretar la capacidad de adsorción de cada lecho en cada condición de experimentación, además se realizó una segunda prueba para asegurar la repetitividad y confiabilidad de los datos obtenidos, este proceso fue aplicado para ambas activaciones (base y ácido).

- **Pruebas con Lechos Mixtos**

Para esta prueba de adsorción se empleó el mismo proceso de adsorción anteriormente detallado, con la única diferencia que en estas pruebas se trabajó con un sistema de adsorción donde el lecho estuvo conformado por materiales de ambas activaciones (base y ácido), en la misma columna como se expone a continuación:

Para esta prueba cada columna trabajo con 1500 gramos del material absorbente, se utilizó 750 gramos del material activado en base y 750 gramos del material activado en ácido, esto se realizó para los dos MLO. Seguidamente en cada columna se colocaron tres bolsas de lecho adsorbente activado en ácido (2,5 pH) en su parte superior, mientras que el lecho adsorbente activado en base (11,5 pH) en su parte inferior.

- **Prueba de Saturación**

La prueba de saturación se realizó con los lechos mixtos bajo las mismas condiciones que las pruebas anteriores, con un volumen de filtración de 40 litros. Su objetivo fue determinar el punto de saturación del material adsorbente, es decir, cuando su capacidad para retener iones de dureza, como calcio y magnesio, llega al 0%. Esta prueba es fundamental para evaluar la eficiencia del material en la remoción de dureza, optimizar el diseño y rendimiento del sistema de tratamiento, y definir la frecuencia de regeneración del adsorbente, asegurando su operación efectiva.

3.9 Fase IV. Propuesta

La propuesta del diseño del Sistema de Tratamiento para el agua de riego de la comunidad La Primavera se realizó en los siguientes pasos:

- A través de visitas de campo, se realizaron mediciones de las dimensiones del tanque de captación existente en la comunidad y se estimó el caudal del sistema de riego.
- Se utilizó el programa AutoCAD para la recreación del tanque.
- A partir de los resultados experimentales de adsorción, se diseñó un sistema de tratamiento ajustado a las condiciones de riego.
- Se revisaron en los catálogos comerciales las dimensiones de los equipos diseñados, para seleccionar unidades comerciales para el sistema de depuración.
- Se realizó una representación de las unidades en 3D.
- Se diseñó la propuesta en una representación 2D Y 3D.
- Se cotizaron los precios de los equipos y accesorios propuestos.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos pertinentes a la descripción de la problemática presente en la comunidad que afecta al sistema de riego, la elaboración de los lechos de adsorción a base los MLO de Santa Clara y Santa Teresa, así como los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua de riego y los análisis en las columnas de adsorción que brindaron la información necesaria para conocer la factibilidad de usar lechos oxídicos como material adsorbente de iones como la dureza, cloruros y sulfatos.

4.1 Problemática en la Comunidad La Primavera

4.1.1 Características de la Comunidad La Primavera

La comunidad La Primavera (Figura 27), se localiza en la parroquia Juan de Velasco del cantón Colta, preserva los páramos de donde se origina el río Pangor. Sus habitantes (32 familias) se dedican principalmente a la agricultura y la ganadería, con un énfasis en la cría de ganado bovino. La superficie total de la comunidad abarca 38,5 hectáreas, donde se cultivan principalmente maíz, frijol, papa, pastos, papa china, calabaza, trigo y cebada.



Figura 27. Comunidad La Primavera

Fuente: Autores

En la Figura 28 y en la Tabla 5 se muestra el mapa y las coordenadas de ubicación de la comunidad La Primavera.

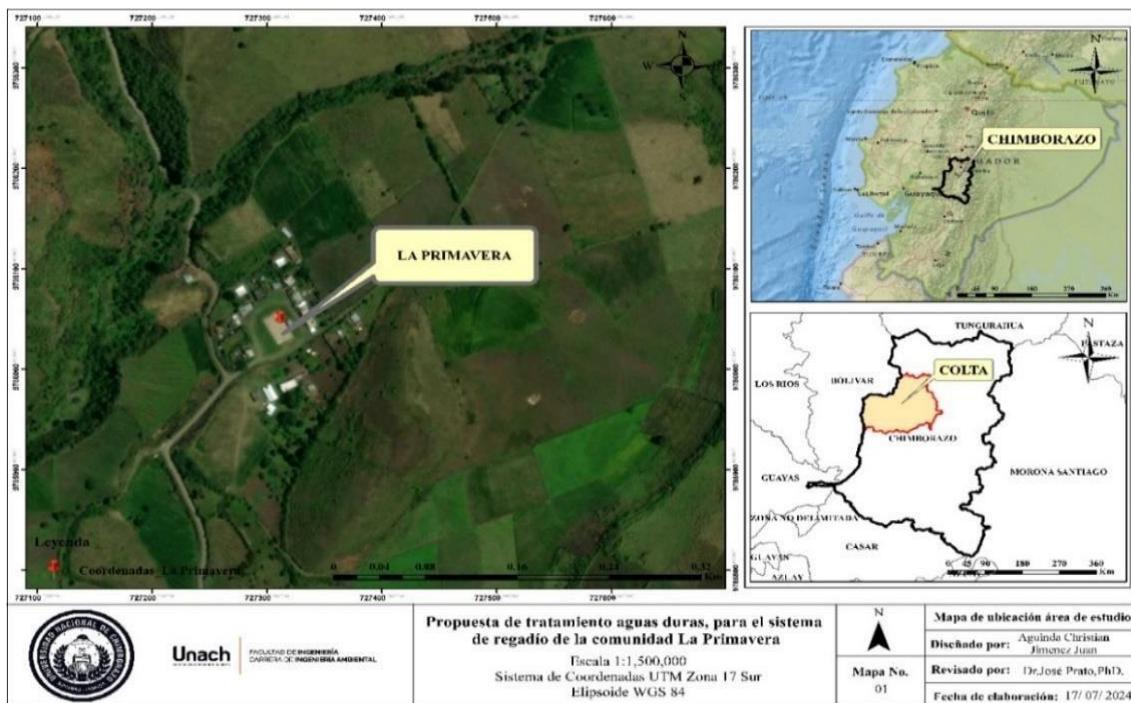


Figura 28. Mapa de ubicación de la comunidad La Primavera

Fuente: Autores

Tabla 5. Coordenadas de ubicación de la comunidad La Primavera

	Coordenadas X	Coordenadas Y
Punto	727311,4574	9786040,345

Fuente: Autores

La fuente principal de agua para el sistema de riego de la comunidad La Primavera, es proveniente de las vertientes de la **Quebrada el Cedro** (Figura 29), desde este punto captan y llevan el agua mediante tubería cerrada de presión hasta la zona de riego ubicada en el área poblada de la comunidad. El recurso hídrico atraviesa formaciones geológicas ricas en minerales de calcio y magnesio. Aunque esta agua es abundante y generalmente limpia, presenta un problema común en muchas áreas rurales, una dureza elevada.



Figura 29. Quebrada El Cedro y sistema de captación

Fuente: Autores

En la Figura 30 se muestran las dimensiones (cm) principales del sistema de captación para la red de riego actual, el tanque tiene una forma trapezoidal y está formado por varias secciones las cuales son un desarenador, un rompe presión y un tanque de máquinas (llaves y bombas) además cuenta con 3 compuertas de paso, está construido a base de muros de hormigón armado. También se muestra una representación 3D del tanque para mayor visibilidad.

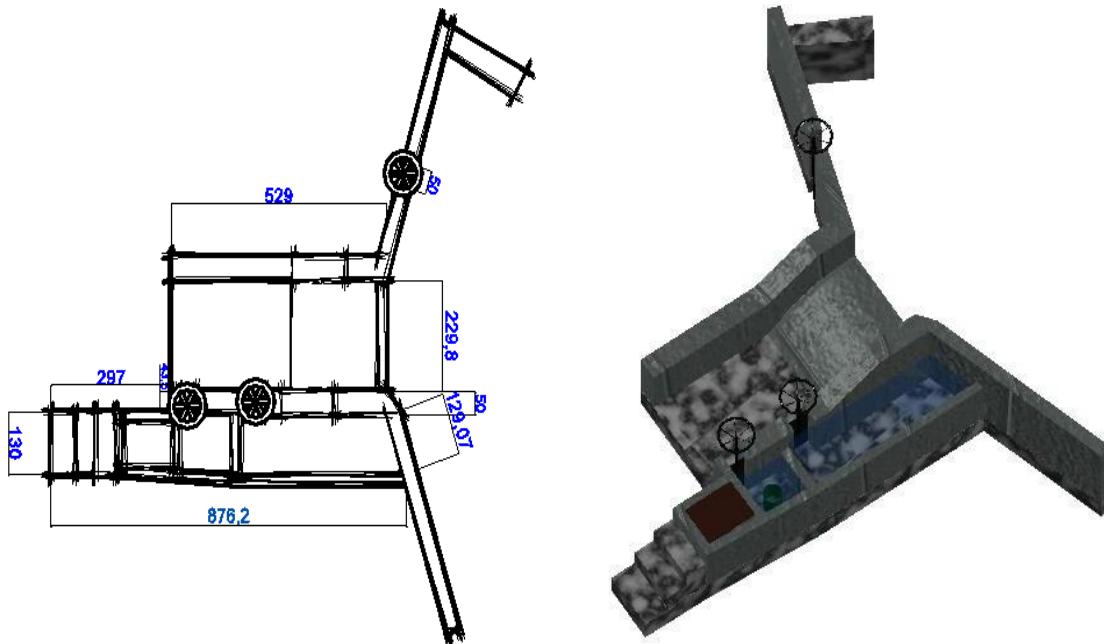


Figura 30. Representación del sistema de captación para la red de riego actual

Fuente: Autores

4.2 Descripción de la Problemática en el Sistema de Riego

El sistema de riego actual, diseñado para abastecer 38,5 hectáreas, enfrenta un problema recurrente relacionado con la acumulación de minerales disueltos, especialmente sales responsables de la dureza del agua, como el calcio y el magnesio. Estas sales se precipitan y forman depósitos en el interior de las tuberías, aspersores y llaves, lo que provoca obstrucciones frecuentes. Estas incrustaciones no solo afectan la eficiencia del sistema, sino que también generan interrupciones en la distribución del agua, disminuyendo la efectividad del riego en las parcelas agrícolas.

El resultado de este fenómeno es un impacto económico considerable, ya que los agricultores deben realizar mantenimientos periódicos, con una frecuencia casi semestral, para limpiar o reemplazar componentes afectados por la acumulación de sedimentos. Estos costos adicionales, que incluyen tanto mano de obra como repuestos, representan una carga financiera significativa para los usuarios del sistema, afectando la sostenibilidad a largo plazo de la infraestructura de riego. En la Figura 31 se ilustran los principales componentes del sistema de riego que han sido identificados de forma externa.



Figura 31. Tuberías y equipos del sistema de riego

Fuente: Autores

4.3 Caracterización Fisicoquímica del Agua

Las características fisicoquímicas del agua que se utiliza para el riego de los cultivos de acuerdo al análisis realizado determinan que el agua cumple con los estándares para ser utilizada como agua de riego.

A continuación, se presenta en la Tabla 6 los resultados del análisis del agua basados en diversos parámetros de calidad, proporcionados de las pruebas realizadas en el laboratorio de Servicios Ambientales de la UNACH:

Tabla 6. Análisis fisicoquímico del agua de riego de la comunidad

Parámetro	Concentración obtenida	Valor máximo aceptable para aguas de uso agrícola o de riego	Valor máximo aceptable para aguas de consumo humano y doméstico que requieren tratamiento convencional
Turbidez (NTU)	1,66	No reporta	100
pH (-)	8,17	6 - 9	6 - 9
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4,67	-	-
Alcalinidad (mg CaCO_3/L)	52	100	10
Fosfatos (mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{L}$)	0,02	No reporta	250
Carbonatos (meq/L)	0,168	1,5 - 8,5	No reporta
Bicarbonatos (meq/L)	0,257	No reporta	No reporta
Dureza (mg CaCO_3/L)	221,67	No reporta	No reporta
Cloruros (mg Cl^-/L)	4,24	250	250
Sulfatos (mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$)	99,34	No reporta	250

Fuente: Autores, adaptado de (Ministerio del Ambiente, 2015)

Según la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, (Ministerio del Ambiente, 2015) los parámetros de turbidez, pH y alcalinidad están por debajo de los límites máximos permisibles para ser usada como agua de riego y de consumo, es decir, para estos parámetros el agua no requiere tratamiento. Los fosfatos, carbonatos y bicarbonatos están en concentraciones mínimas y no representan un peligro para el sector agrícola y ganadero de la zona.

Los cloruros de acuerdo a la normativa nacional (Ministerio del Ambiente, 2015), están en una concentración que para un sistema de riego por aspersión se podría considerar con un grado de restricción severo. Si bien las concentraciones elevadas de cloruros pueden llegar a ser corrosivas, los 4,24 mg/L es una concentración que requiere algún tratamiento. El valor de 99,34 mg/L correspondiente a la concentración de los sulfatos está por debajo del límite recomendado de 250 mg/L por la EPA para el agua potable (Truque, 2013). Concentraciones elevadas de sulfatos pueden modificar el sabor del agua y generar alguna reacción laxante.

La dureza total del agua según (Mora-Alvarado et al., 2015) si se encuentra entre 180-270 mg/L CaCO_3 se considera como agua dura. Los 221,67 mg/L CaCO_3 indica que el agua del sistema de riego es un agua dura, y según la caracterización fisicoquímica de la misma esta dureza tiende a ser permanente al estar relacionada a iones de sulfatos, cloruros, que están en mayor proporción que iones carbonato y bicarbonato (Mora-Alvarado et al., 2015). La concentración elevada de dureza se relaciona al problema principal que presenta la comunidad La Primavera y que está afectando a su sistema de riego.

4.4 Estudio del Proceso de Adsorción

En este apartado, se presentan los resultados del equilibrio de adsorción, de las pruebas de remoción de iones realizadas en columnas y de la eficiencia de los dos tipos de lechos.

4.4.1 Equilibrio de Adsorción

El estudio del equilibrio de adsorción se realizó tanto con los lechos naturales y lechos activados (básicos y ácidos), en estas pruebas se evaluó la relación entre el tiempo de equilibrio en la adsorción y el tamaño de partícula de cada lecho. A continuación, se muestran los resultados del estudio del tiempo de equilibrio de adsorción para los lechos sin activar (natural) de los dos tipos de MLO: Santa Clara y Santa Teresa, para la retención iónica de la dureza, los cloruros y los sulfatos.

En la Figura 32A, muestra que las fracciones de partícula más pequeñas del MLO Santa Clara tienen un mejor funcionamiento, es decir, los lechos de (<75) μm y ($75-150$) μm , reducen la dureza hasta los 50 y 44,44 mg/L de CaCO_3 . Por su parte la Figura 32B, Santa Teresa, se observa que las fracciones más grandes funcionan mejor, es decir, los lechos de ($75-150$) μm y ($150-250$)

μm, alcanzan a reducir la dureza hasta los 33,33 y 38,86 mg/L de CaCO_3 , la discrepancia de actividad puede estar relacionada con diferencias en la composición química de ambos materiales oxídicos (Prato et al., 2022).

Así mismo se observa que para ambos tipos de lecho, durante los primeros 180 minutos (3 horas) se obtiene una rápida reducción de la concentración, luego los materiales se van saturando, para finalmente, alcanzar el equilibrio a partir de los 2880 minutos (48 horas).

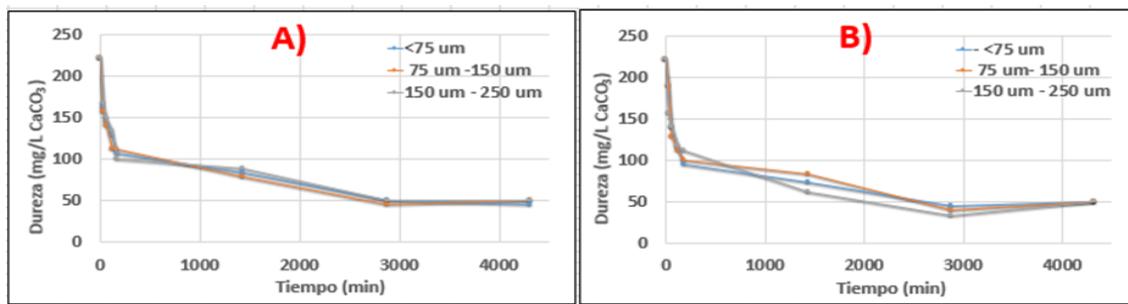


Figura 32. Tiempo de equilibrio de adsorción de la dureza del agua con los lechos: A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

En la Figura 33A Santa Clara y en la Figura 33B Santa Teresa, se puede evidenciar que las fracciones de partículas de mayor tamaño presentan un rendimiento superior en el proceso de adsorción, los lechos de (75-150) μm y (150-250) μm, redujeron la concentración de cloruros hasta los 1,77 y 1,47 mg/L de Cl^- respectivamente, es decir; la retención de los iones cloruro es rápida y el equilibrio se alcanza a partir de 180 minutos.

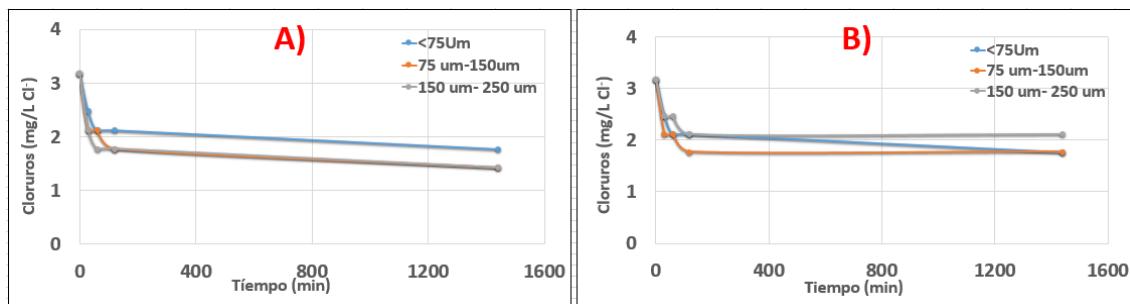


Figura 33. Tiempo de equilibrio de adsorción de los cloruros del agua con los lechos: A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

En la Figura 34A, Santa Clara y la Figura 34B, Santa Teresa la fracción de partícula que proporcionó los mejores resultados fue la de (75-150) μm, reduciendo la concentración de los sulfatos hasta 13,33 y 10,24 mg/L de SO_4^{2-} . La retención de los iones sulfatos es similar a el caso de los iones cloruros (ambos aniones).

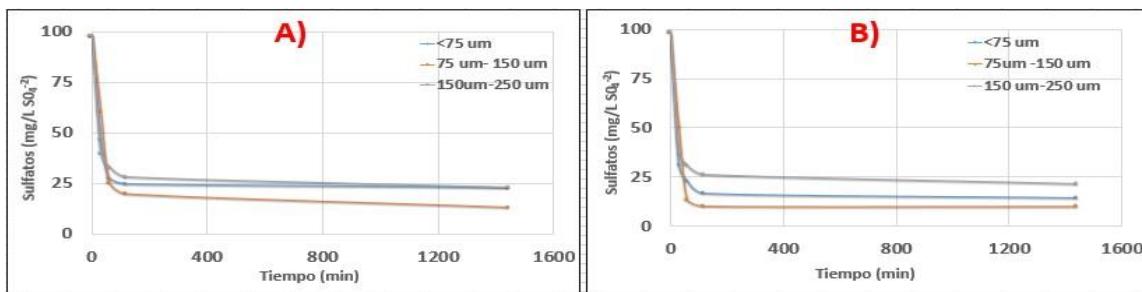


Figura 34. Tiempo de equilibrio de adsorción de los sulfatos del agua con los lechos: A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

Los resultados de los lechos básicos activados con (NaOH) a un pH de 11,5 y para los lechos ácidos activados con HCl a un pH de 2,5 de Santa Clara y Santa Teresa se reportan en los anexos.

4.4.2 Adsorción en Columnas

Las pruebas de adsorción en columnas se realizaron con los MLO de Santa Clara y Santa Teresa para conocer cuál funcionaba mejor en la remoción de los iones dureza, cloruros y sulfatos presentes en el agua natural. Se realizaron pruebas por duplicado y los lechos utilizados fueron, lechos sin activar (Natural) con un pH neutro, lechos básicos activados a un pH de 11,5 y lechos ácidos tratados a un pH de 2,5; cada columna contuvo 1,5 kg de lecho y se trataron por columna 12 litros del agua.

4.4.3 Pruebas de Adsorción con Lechos Sin Activar (Natural)

Como se observa en la Figura 35A, con el lecho de Santa Clara, la concentración de la dureza baja hasta los 83,33 mg/L de CaCO₃, y conforme la cantidad de agua aumenta el material va perdiendo efectividad, pero no llega a saturarse manteniéndose en 183,33 mg/L de CaCO₃. Mientras en la Figura 35B, con el MLO Santa Teresa la dureza baja hasta los 66,67 mg/L de CaCO₃, y conforme avanza el proceso de adsorción, disminuye la retención lentamente, hasta que el material no mantiene una eficacia constante, obteniendo al final de los 12 litros un nivel de dureza de 166,67 mg/L de CaCO₃, sin alcanzar la saturación del lecho.

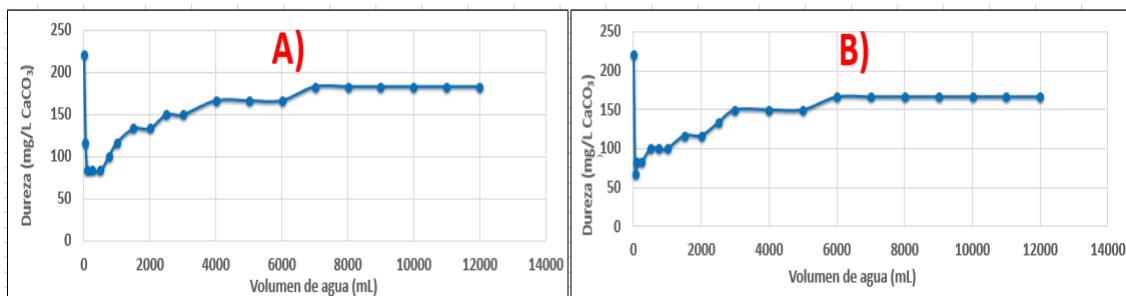


Figura 35. Adsorción de la dureza con lechos sin activar (Natural) A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

En la Figura 36A, Santa Clara y en la Figura 36B, Santa Teresa, se puede observar que ambos tipos de lecho llegan a bajar la concentración de los cloruros durante el comienzo hasta los 2,48 y 1,47 mg/L Cl⁻ y aunque ninguno de los dos llega a saturarse después de los 12 litros, ambos mantienen una concentración de los 3,54 mg/L Cl⁻, esto muestra que los lechos de Santa Teresa tuvieron mejores resultados en la etapa inicial del proceso de adsorción.

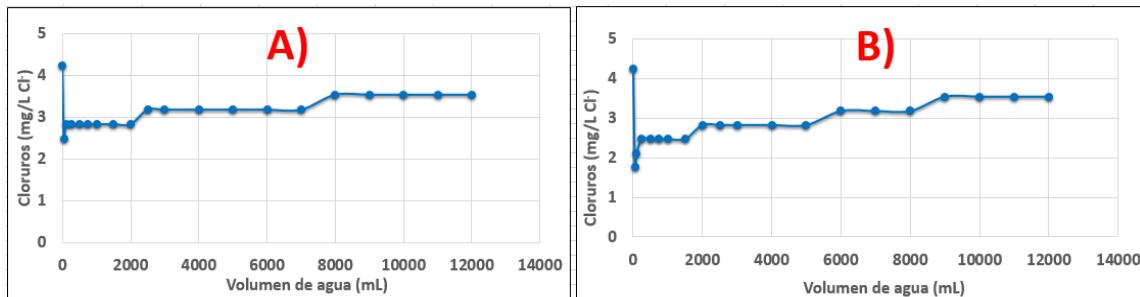


Figura 36. Adsorción de iones cloruros con lechos sin activar (Natural) A) Santa Clara y B) SantaTeresa

Fuente: Autores

La Figura 37A muestra que el MLO Santa Clara obtuvo mejor resultado, disminuyendo la concentración de los iones sulfatos en el agua hasta los 30,52 mg/L de SO₄²⁻ en comparación con el MLO Santa Teresa (Figura 37B), que alcanzó los 42,44 mg/L de SO₄²⁻, en ninguno de los casos el material se saturó.

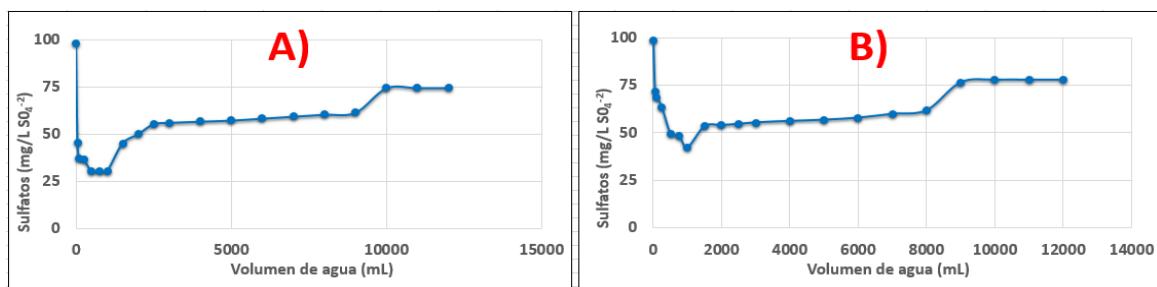


Figura 37. Adsorción de iones sulfatos con lechos sin activar (Natural) A) Santa Clara y B) SantaTeresa

Fuente: Autores

4.4.4 Pruebas de Adsorción con Lechos Activados con NaOH (Básico)

En la Figura 38 se puede observar que ambos materiales activados disminuyen rápidamente la dureza del agua y van perdiendo la capacidad de retención lentamente durante el proceso, sin llegar a saturarse al final de los 12 L de agua tratada, con el MLO Santa clara (Figura 38A) se obtiene una concentración final de 16,67 mg/L de CaCO₃ manteniéndose estable hasta los 100 mg/L de CaCO₃ mientras que con el MLO Santa Teresa (Figura 38B) se obtiene una concentración final de 16,67 mg/L de CaCO₃ manteniéndose estable hasta los 133,33 mg/L de CaCO₃.

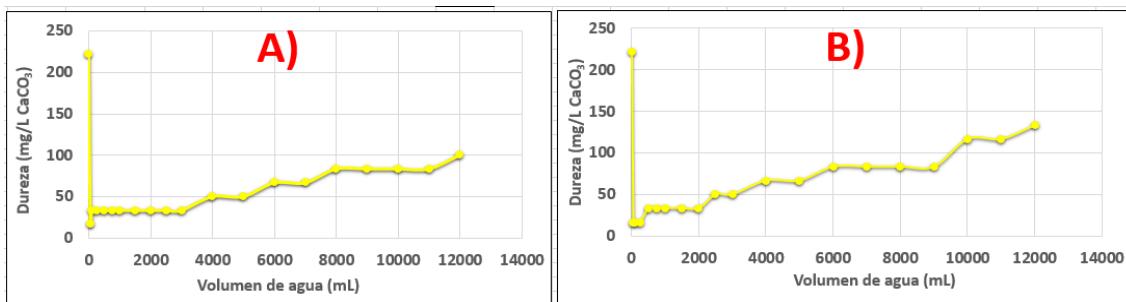


Figura 38. Adsorción de la dureza con lechos activados con NaOH: A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

La Figura 39, muestra que ambos materiales activados tienen un comportamiento similar en la retención de los iones cloruros, como se observa el MLO Santa Clara (Figura 39A) y el MLO Santa Teresa (Figura 39B) bajaron la concentración de los cloruros hasta 2,48 mg/L y mantuvieron un comportamiento estable sin llegar a saturarse.

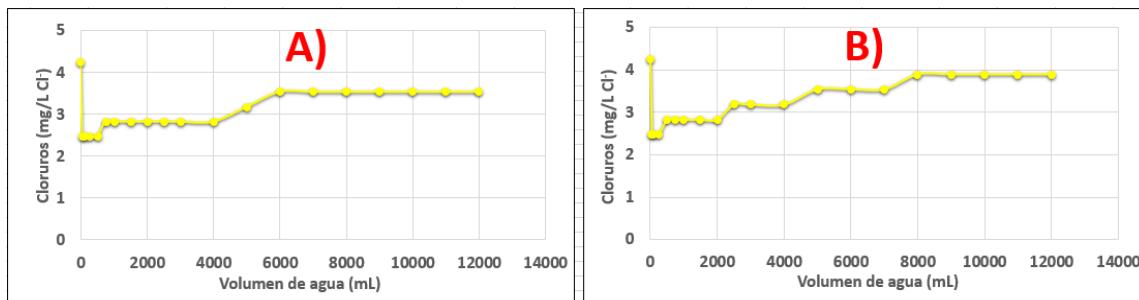


Figura 39. Adsorción de iones cloruros con lechos activados con NaOH: A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

En la Figura 40, se puede observar; que la adsorción de los iones sulfatos para ambos materiales fue muy buena, la (Figura 40A), Santa Clara y la (Figura 40B), Santa Teresa, redujeron la concentración de sulfatos hasta los 14,68 y los 17,70 mg/L de SO_4^{2-} respectivamente y al igual que las pruebas anteriores ninguna llega al punto de saturación y mantienen la concentración de iones sulfatos después de 12 litros, por debajo de los 50 mg/L de SO_4^{2-} .

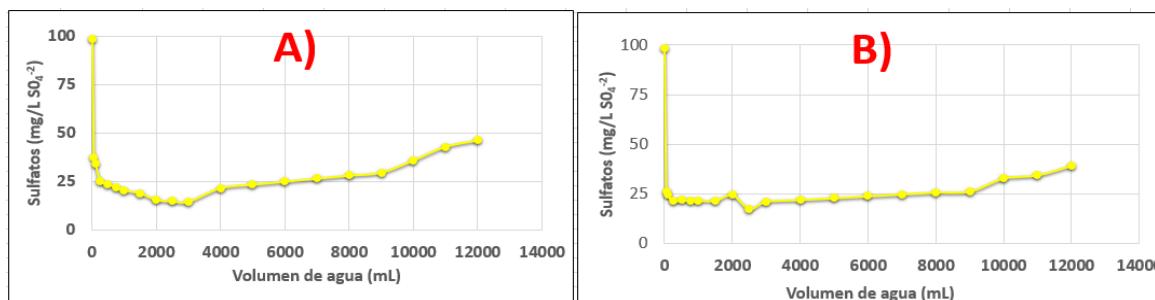


Figura 40. Adsorción de iones sulfatos con lechos activados con NaOH: A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

4.4.5 Pruebas de Adsorción de con Lechos Activados con HCl (ácido)

La Figura 41, muestra un comportamiento diferente a la tendencia normal de resultados anteriores, aquí se puede observar que la remoción de la dureza es lenta y constante hasta los 11 litros donde el lecho empieza a saturarse. La (Figura 41A), Santa Clara bajo la concentración de la dureza hasta los 100 mg/L de CaCO_3 , por otro lado, la (Figura 41B), Santa Teresa bajo la concentración de la dureza hasta 133,33 mg/L de CaCO_3 . Esto nos muestra que el rendimiento del MLO Santa Clara fue mejor.

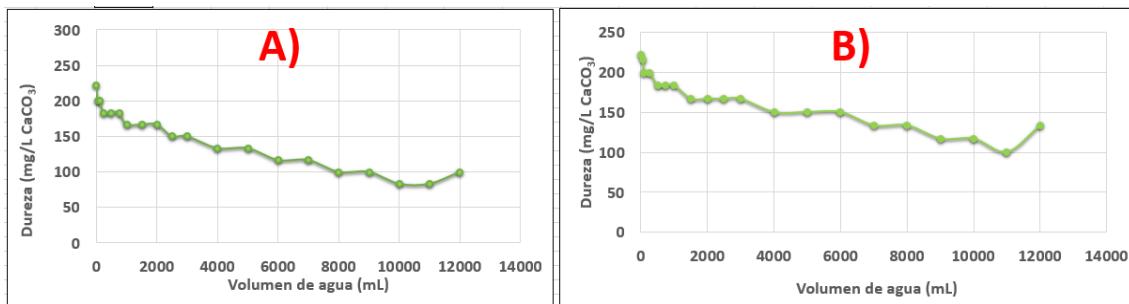


Figura 41. Adsorción de la dureza con lechos activados con HCl: A) Santa Clara y B) SantaTeresa
Fuente: Autores

La Figura 42, muestra que la adsorción de los iones cloruros con el MLO activado con un ácido es similar para ambos tipos de lecho, Figura 42A - Santa Clara y Figura 42B - Santa Teresa, que disminuyeron los cloruros hasta los 2,89 mg/L de Cl^- y se mantuvieron constantes hasta el final de la prueba.

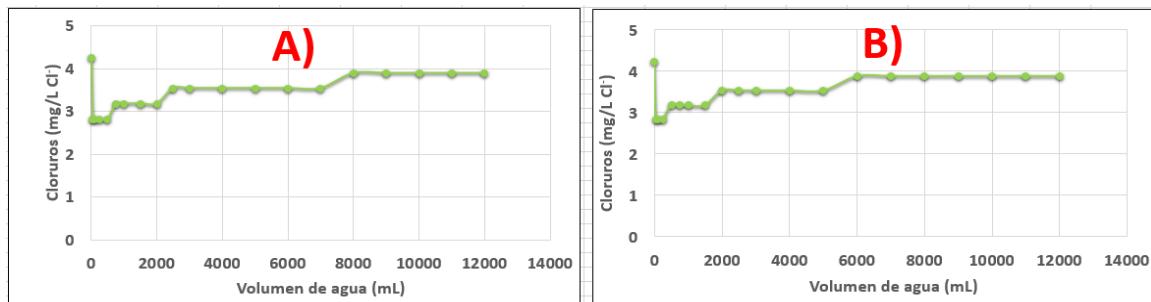


Figura 42. Adsorción de iones cloruros con lechos activados con HCl: A) Santa Clara y B) SantaTeresa
Fuente: Autores

En la Figura 43, se puede observar la disminución de los iones sulfatos cuando el MLO está activado con un ácido; con el MLO Santa Clara (Figura 43A), se logra bajar la concentración de los sulfatos hasta los 6,67 mg/L de SO_4^{2-} y se mantuvo en 33,93 mg/L de SO_4^{2-} al final de los 12 litros. Mientras el material de Santa Teresa (Figura 43B), bajó los niveles de sulfatos hasta 8,54 mg/L de SO_4^{2-} y se mantuvo en 30,78 mg/L de SO_4^{2-} después de los 12 litros. En ambos casos el material no llega al punto de saturación.

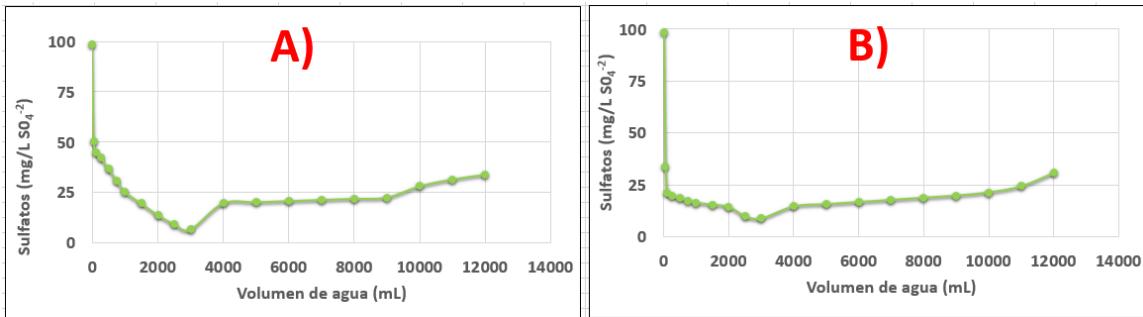


Figura 43. Adsorción de iones sulfatos con lechos activados con HCl: A) Santa Clara y B) Santa Teresa
Fuente: Autores

4.4.6 Eficiencia de Adsorción de los Lechos

El porcentaje de eficiencia es el valor numérico que ayuda a entender cuál de las pruebas anteriores obtuvo el mejor rendimiento, resultado que será de gran importancia para el diseño de la propuesta de tratamiento para el agua de riego de la comunidad La Primavera.

En la Figura 44, se presenta la comparativa entre pruebas de adsorción de la dureza con los dos tipos de lechos utilizados. Los lechos Santa Clara (A) y Santa Teresa (B) muestran que es mejor utilizar lechos activados básicos para remover la dureza del agua.

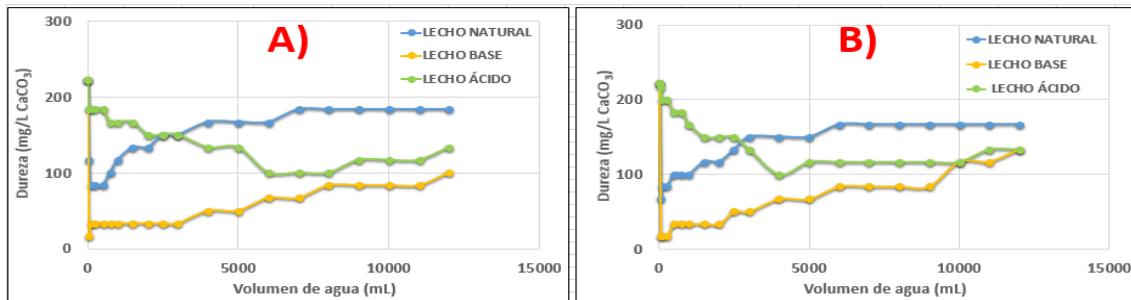


Figura 44. Comparativa entre las pruebas de adsorción de la dureza lechos A) Santa Clara y B) Santa Teresa
Fuente: Autores

La Figura 45, muestra el porcentaje de eficiencia alcanzado en cada prueba para la remoción de la dureza en el agua, los lechos Santa Clara y Santa Teresa muestran que la prueba con mayor rendimiento para ambos tipos de lecho fue la realizada con una activación básica, alcanzando el 71,21% y el 64,47% de eficiencia.

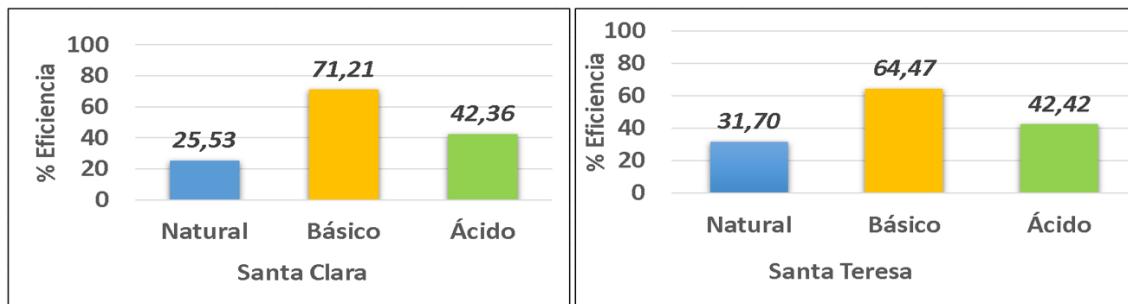


Figura 45. Porcentaje de eficiencia en la adsorción de la dureza

Fuente: Autores

En la Figura 46, se presenta la comparativa entre las pruebas de adsorción de iones cloruros con los lechos Santa Clara (A) y Santa Teresa (B). Los resultados indican que el uso de lechos naturales y tratados con soluciones básicas es más eficiente para la remoción de cloruros del agua, en comparación con aquellos activados mediante soluciones ácidas.

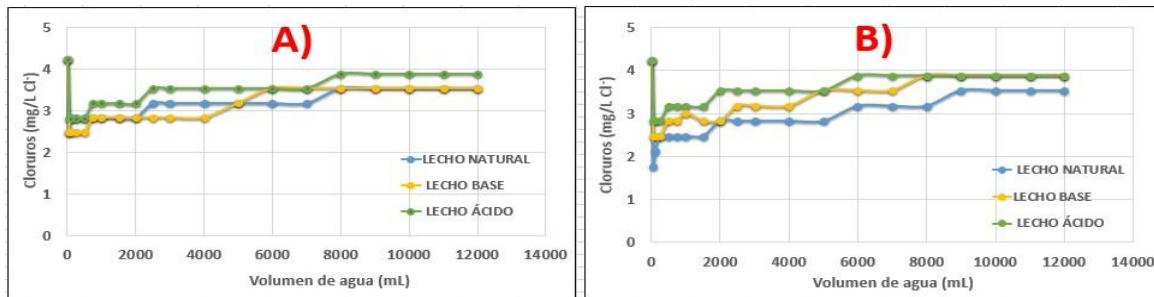


Figura 46. Comparativa entre las pruebas de adsorción de Cloruros lechos A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

La Figura 47, muestra el porcentaje de eficiencia alcanzado en cada prueba para la remoción de cloruros, en el caso del MLO Santa Clara (Figura 47A) se muestra que el mayor rendimiento se obtuvo con lecho básico, alcanzando el 23,14%, sin embargo, el lecho natural muestra un rendimiento similar alcanzando el 22,87%. En tanto en la Figura 47B (Santa Teresa) se pude observar que el mayor rendimiento se obtuvo solo con el lecho básico con un 26,92%.

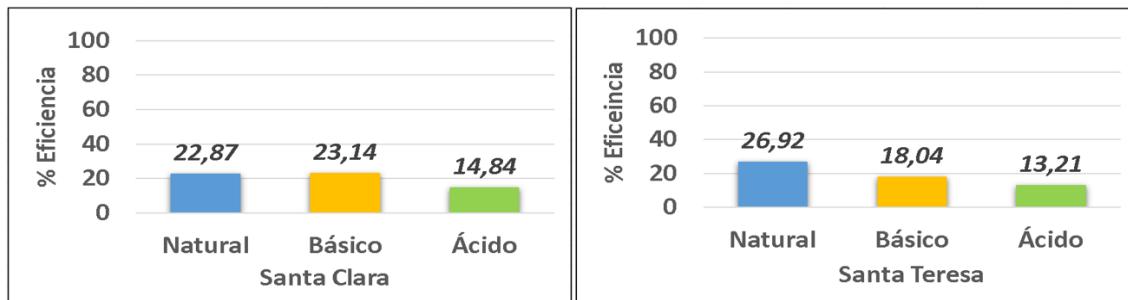


Figura 47. Porcentaje de eficiencia en la adsorción de cloruros

Fuente: Autores

En la Figura 48, se muestra la comparativa entre pruebas de adsorción de sulfatos con los lechos Santa Clara (A) y Santa Teresa (B), donde se pude observar que utilizar lechos ácidos para remover los sulfatos del agua presentan los mejores resultados.

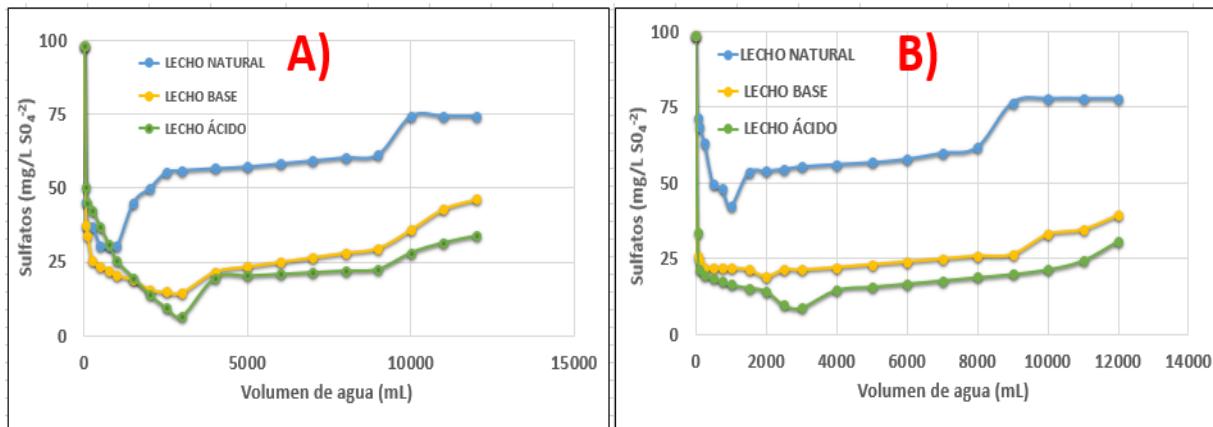


Figura 48. Comparativa entre las pruebas de adsorción de sulfatos lechos A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

La Figura 49, muestra el porcentaje de eficiencia alcanzado en cada prueba para la remoción de sulfatos, en ambos materiales se observa que los mayores rendimientos fueron alcanzados con lechos activados en ácido, logrando eficiencias del 71,63% y 81,11%, respectivamente. Igualmente, en ambos casos, los lechos activados en básico también mostraron resultados favorables.

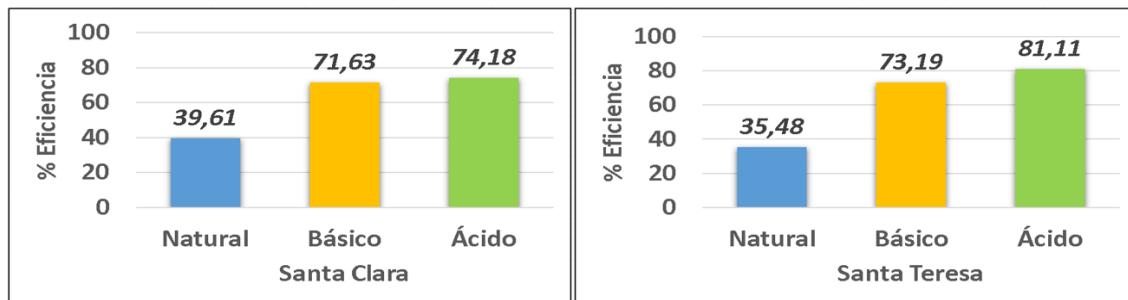


Figura 49. Porcentaje de eficiencia en la adsorción de sulfatos

Fuente: Autores

4.4.7 Pruebas de Adsorción con Lechos Mixtos

Se llevó a cabo la prueba de adsorción con lecho mixto con el objetivo de evaluar si la combinación de lechos básicos y ácidos en la columna puede incrementar el rendimiento del proceso, es decir, mejorar la eficiencia en comparación con las pruebas individuales anteriores. En la Figura 50, se muestran los resultados de las pruebas de adsorción de dureza con lechos mixtos, tanto para los lechos de Santa Clara y Santa Teresa.

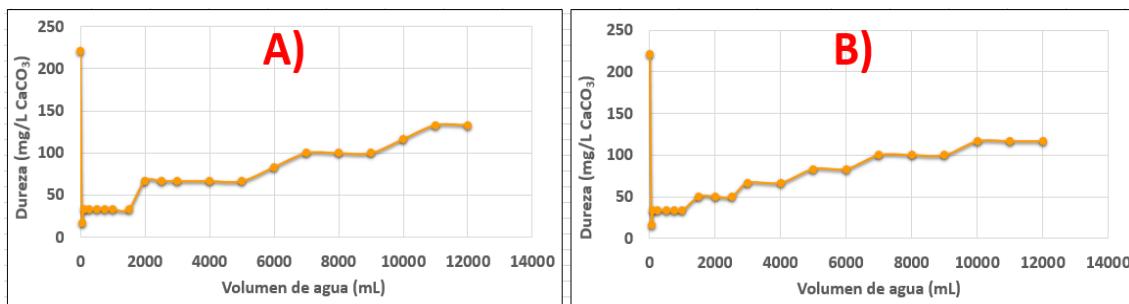


Figura 50. Adsorción de dureza con lechos mixtos A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

Como se observa en la Figura 50, los lechos mixtos de ambos MLO reducen la dureza del agua sin saturarse, presentando comportamientos similares y al final del proceso se obtienen las concentraciones para los lechos Santa Clara (A) de 16,67 mg/L de CaCO_3 hasta 133,33 mg/L de CaCO_3 . Para los lechos de Santa Teresa (B) se obtuvieron concentraciones de 16,67 mg/L de CaCO_3 hasta 116,67 mg/L de CaCO_3 .

En la Figura 51 se muestra el porcentaje de eficiencia alcanzado en la prueba con lechos mixtos para la remoción de la dureza.

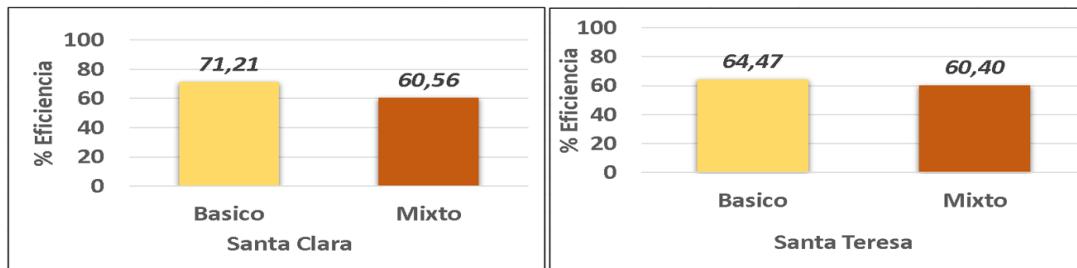


Figura 51. Porcentaje de eficiencia de adsorción de dureza con lechos Mixtos

Fuente: Autores

Como se observa en la Figura 51, el MLO de Santa Clara y Santa Teresa presentaron el mismo rendimiento superior al 60%.

Al comparar con el lecho básico (Figura 45), se observa que al emplear lechos mixtos se disminuye la eficacia en la remoción de la dureza del agua, esto está asociado que al tener menor cantidad de material adsorbente con cargas negativas, se pierde efectividad (Prato et al., 2022).

En la Figura 52, se muestran los resultados de las pruebas de adsorción de cloruros con lechos mixtos. Ambos materiales muestran un comportamiento similar en ambos casos la concentración de Cloruros baja hasta los 2,89 mg/L de Cl^- . En este caso los lechos Santa Teresa (B) obtienen una remoción más rápida.

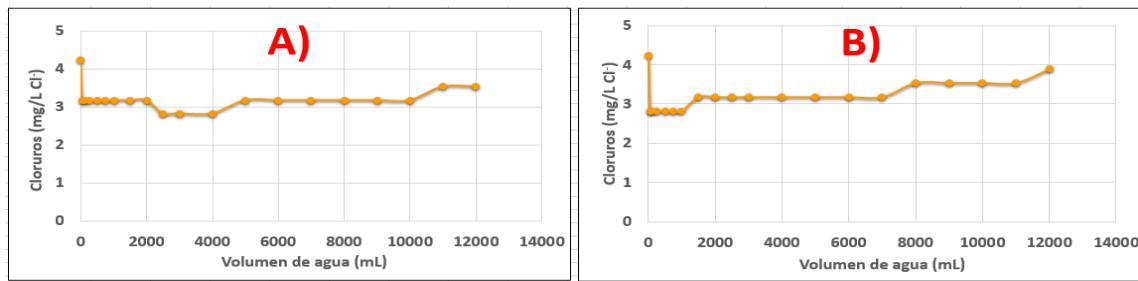


Figura 52. Adsorción de cloruros con lechos mixtos A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

En la Figura 53, se observa el porcentaje de eficiencia alcanzado por los lechos mixtos en la remoción de cloruros, los lechos mixtos Santa Clara alcanzaron una eficiencia de 24,96% y los lechos mixtos Santa Teresa obtuvieron una eficiencia de 21,74%.

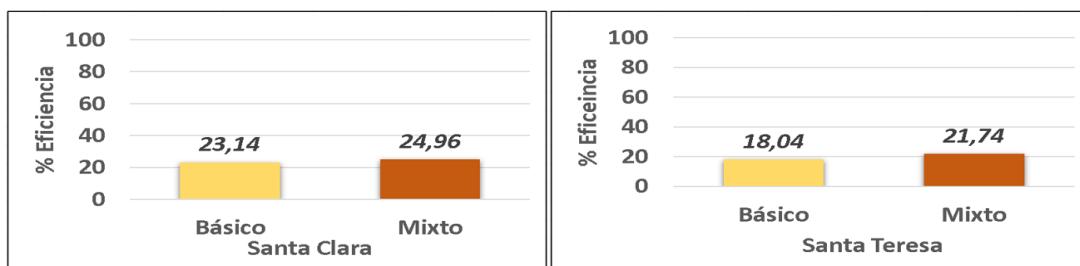


Figura 53. Porcentaje de eficiencia de adsorción de cloruros con lechos Mixtos

Fuente: Autores

En la Figura 54, se muestran los resultados de las pruebas de adsorción de sulfatos con lechos mixtos. El MLO Santa Clara (Figura 54A), presenta un comportamiento más lineal, manteniendo la concentración de sulfatos cerca de los 25 mg/L de SO_4^{2-} . Por otro lado, con el material de Santa Teresa (Figura 54A), se logró bajar la concentración de sulfatos hasta 15,72 mg/L de sulfatos y fue subiendo constantemente hasta los 38,65 mg/L de SO_4^{2-} .

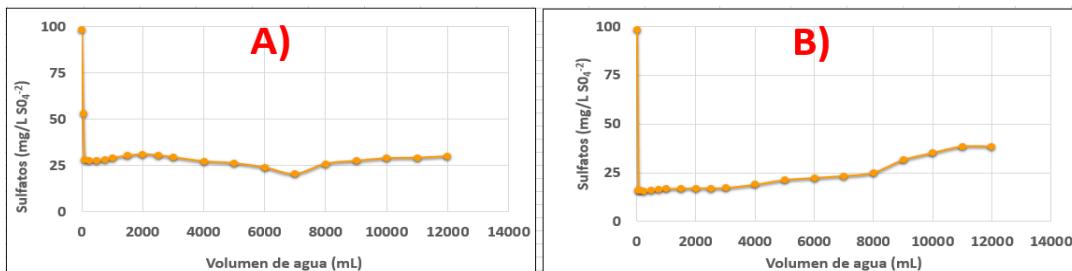


Figura 54. Adsorción de sulfatos con lechos mixtos A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

En la Figura 55, se observa el porcentaje de eficiencia alcanzado por los lechos mixtos en la remoción de sulfatos, los lechos mixtos Santa Clara alcanzaron una eficiencia de 72,02% y los lechos mixtos Santa Teresa obtuvieron una eficiencia de 69,50%.

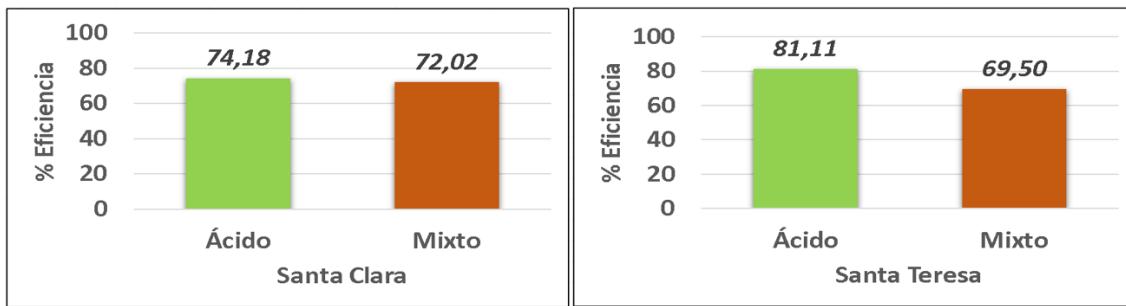


Figura 55. Porcentaje de eficiencia de adsorción con lechos Mixtos

Fuente: Autores

En ambos casos la eficiencia obtenida fue muy buena, sin embargo, para la remoción de sulfatos es mejor usar los lechos ácidos.

4.4.8 Prueba de Saturación de los Lechos

Las pruebas anteriores mostraron que ambos tipos de MLO tienen buenos resultados a la hora de remover la dureza, los cloruros y los sulfatos presentes en el agua, así mismo en ninguna de las pruebas se llegó al punto de saturación. Razón por la cual se tuvo que realizar una prueba para conocer el punto de saturación de los lechos, es decir, cuando los lechos dejan de adsorber iones y llegan al 0% de eficiencia. En este caso, se realizaron pruebas por duplicado haciendo fluir 45000 mL de agua natural y empleando la misma masa de lecho en los sistemas de adsorción.

Como se observa en la Figura 56, ambos tipos de lecho llegan al punto de saturación a los 45 litros, presentando un comportamiento similar durante la remoción de la dureza, sin embargo, los resultados sugieren que los lechos de Santa Teresa presentan un desempeño ligeramente superior, ya que mantienen concentraciones más bajas de manera generalizada.

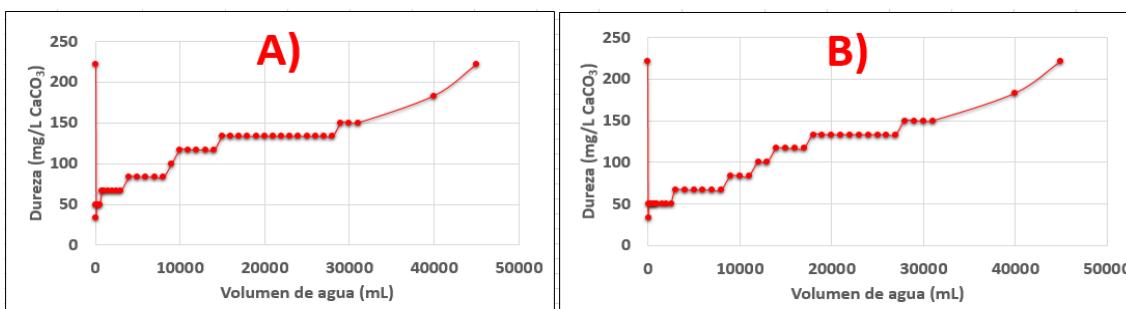


Figura 56. Prueba de saturación de los lechos, reducción de la dureza A) Santa Clara y B) Santa Teresa

Fuente: Autores

En la Figura 57, se muestra el resultado de la prueba de saturación de los lechos al retener los iones cloruro, para los dos tipos de MLO se obtienen resultados similares, saturándose alrededor de los 30 L de agua tratada, sin que haya una diferencia significativa entre ambos rendimientos.

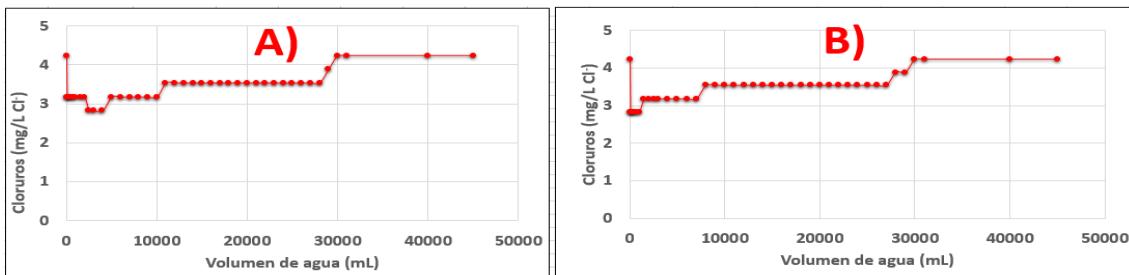


Figura 57. Prueba de saturación de los lechos, reducción de cloruros A) Santa Clara y B) Santa Teresa
Fuente: Autores

En la Figura 58, se muestra el resultado de la prueba de saturación de los lechos al adsorber sulfatos, en este caso, se observa que el material de Santa Clara (Figura 58A) retiene mayor cantidad de iones sulfato, y parece alcanzar la saturación al cabo de los 45 L de agua tratada, mientras que el material de Santa Teresa (Figura 58B) inicia su saturación a los 42 L.

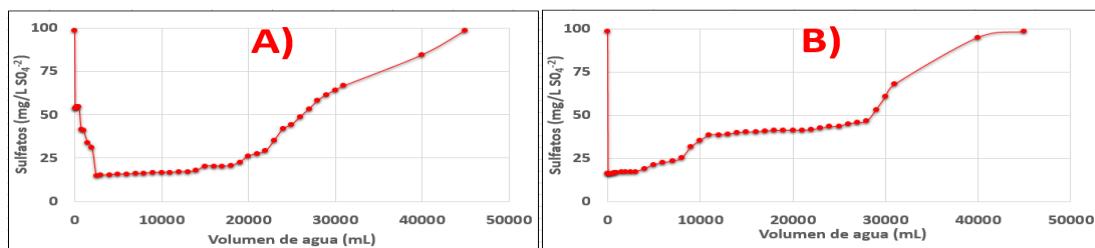


Figura 58. Prueba de saturación de los lechos, reducción de sulfatos A) Santa Clara y B) Santa Teresa
Fuente: Autores

4.4.9 Eficiencia en las Pruebas de Saturación

La Figura 59, muestra los porcentajes de eficiencia alcanzados por los dos tipos de lechos utilizados, se puede observar que el MLO de Santa Clara es ligeramente más eficiente en la retención de aniones (cloruros y sulfatos), mientras que el MLO de Santa Teresa es ligeramente más efectivo en la remoción de la dureza del agua.

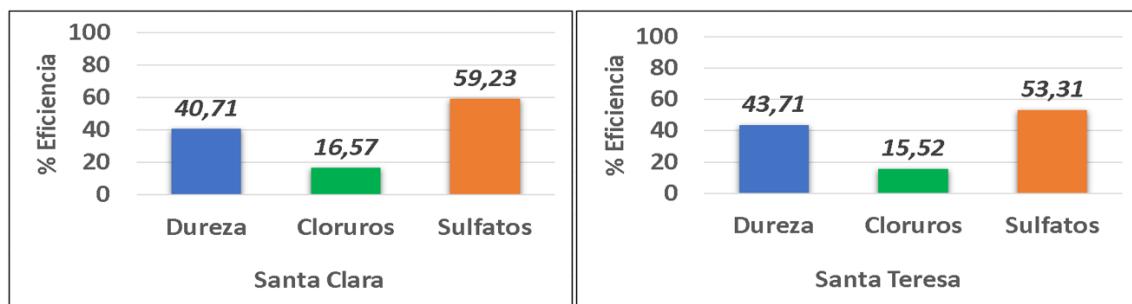


Figura 59. Porcentajes de eficiencia en las pruebas de saturación
Fuente: Autores

Cabe recalcar que para esta prueba los lechos ocupados fueron reutilizados y reactivados varias veces, lo que es un indicativo de la versatilidad y la vida útil del material adsorbente.

CAPÍTULO V. PROPUESTA

5.1 Bases de Partida del Presente Proyecto

La meta final del presente proyecto de investigación consiste en el diseño de una propuesta de tratamiento para el agua de riego de la comunidad La Primavera, basado en los resultados obtenidos escala de laboratorio y reportados en el capítulo IV.

Los cálculos y estimaciones de diferentes equipos del sistema diseñados se basan en los siguientes parámetros y normas:

- a) Normativa para la Calidad Ambiental y Descargas de Efluentes: Recurso Agua. LibroVI.
- b) Los cálculos para el escalado se realizan para satisfacer la demanda de agua empleada para la actividad agrícola de la comunidad La Primavera.
- c) Las dimensiones del escalado del sistema de tratamiento se ajustan a recomendaciones de las bibliografías especializadas, así como de catálogos comerciales existentes en el mercado local.

5.2 Condiciones Preliminares del Sistema de Tratamiento

Antes de exponer el diseño del sistema de tratamiento del agua de riego, se establecen las condiciones preliminares que consisten en la ubicación, estimación del caudal empleado y la selección de las unidades que conforman el sistema.

5.3 Localización del Sistema de Tratamiento

La propuesta consiste en implementar un sistema de adsorción de iones en el agua de riego, empleada en comunidad La Primavera de manera en que se solucionen los problemas descritos anteriormente.

Para ello, se ha propuesto que la ubicación del sistema de tratamiento sea antes del inicio de cada ramal que tiene la red de riego actual (Figura 60).

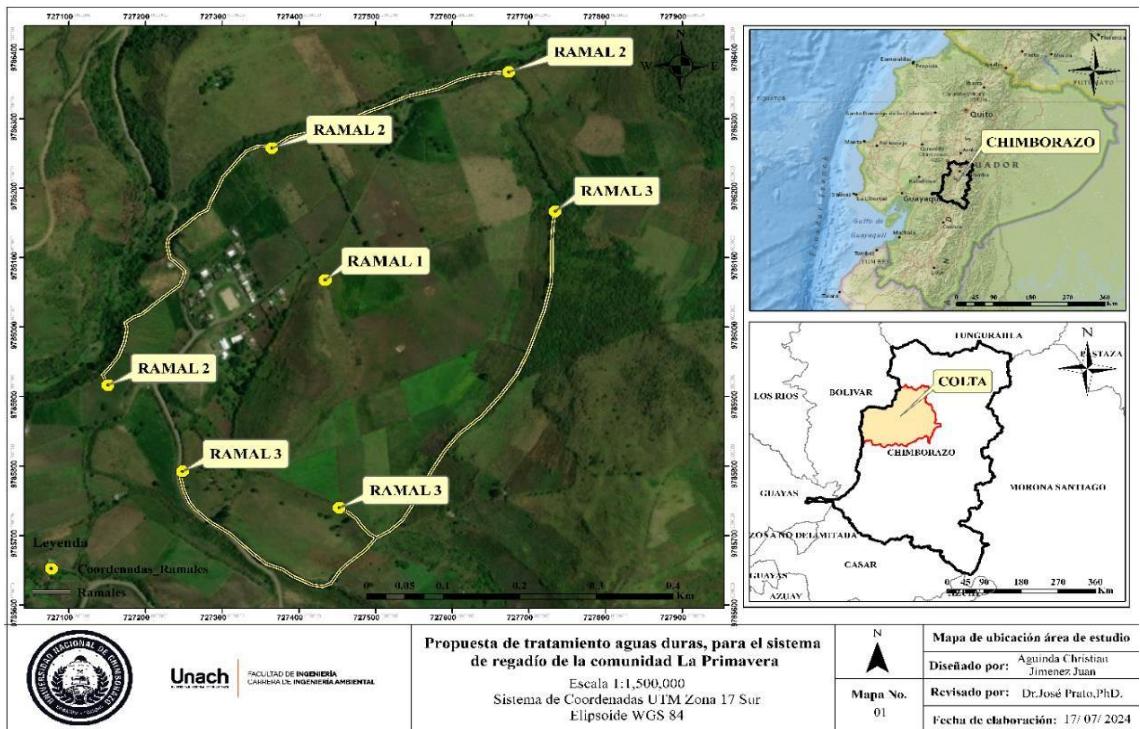


Figura 60. Ubicación de los ramales de riego

Fuente: Autores

5.4 Estimación del Caudal

Para la estimación del caudal se tomó como base la información brindada anteriormente por la Coordinación de Riego del GAD Provincial de Chimborazo al momento de la construcción del sistema de captación brindado a la comunidad en el año 2015. Esta información nos ayuda con el caudal en litros/segundos/habitantes.

Como se puede observar en la Tabla 7 el caudal destinado para las actividades agrícolas varía según el tipo de cultivo y el mes del año. Para el diseño de esta propuesta se asume un caudal de 0,49 L/s/Ha, utilizado en el diseño del sistema de captación hecho por la Gestión de Riego del GAD de Chimborazo en el año 2015.

Una vez obtenido el caudal, se tomó en cuenta los testimonios de la población actual para saber el tiempo de funcionamiento del sistema de riego el cual está entre 8-10 horas al día, del mismo modo se asume una frecuencia de riego de 3 a 4 veces por mes. Con estos valores se puede obtener el número total de litros de agua gastados en un día de riego con la ecuación(1).

$$C_{\text{total}} = \text{caudal (L/s)} * \text{tiempo de riego (h)} \quad (1)$$

$$0,49 \text{ L/s} = 1764 \text{ L/h}$$

$$C_{\text{total}} = 1764 \text{ L/h} * 10 \text{ h}$$

$$C_{\text{total}} = 17640 \text{ litros}$$

En base al valor obtenido se estima que el volumen a tratar de agua al momento de utilizar el sistema de riego será de 17640 litros que corresponderían a 17.64 m³/día.

Tabla 7. Módulo de riego mensualmente según el tipo de cultivo

Meses	Módulo de riego para cultivos de ciclo corto (L/s/Ha)	Módulo de riego para el maíz (L/s/Ha)	Módulo de riego para el pasto (L/s/Ha)
Enero	0,28	0,00	0,00
Febrero	0,25	0,00	0,00
Marzo	0,37	0,00	0,00
Abril	0,08	0,00	0,00
Mayo	0,30	0,36	0,24
Junio	0,39	0,49	0,49
Julio	0,30	0,36	0,48
Agosto	0,37	0,24	0,48
Septiembre	0,46	0,37	0,49
Octubre	0,07	0,36	0,48
Noviembre	0,23	0,49	0,12
Diciembre	0,37	0,36	0,12

Fuente: Autores

5.5 Selección de Unidades del Sistema de Tratamiento

Para la selección de las unidades que conforman el sistema de tratamiento se tomó en cuenta la accesibilidad de que la propuesta de diseño se ajuste a unidades ya existentes en el mercado, tomando en cuenta la durabilidad, la factibilidad técnica y económica de cada una de las partes, así mismo se consideraron los criterios de diseño establecidos por la bibliografía especializada.

El sistema de tratamiento para el agua de riego de la comunidad La Primavera estará conformado por las siguientes unidades:

- Tanque para la activación del material adsorbente.
- Columnas de intercambio iónico o de adsorción.
- Tanque de almacenamiento y distribución del agua tratada.

El espacio requerido para las unidades de tratamiento será de aproximadamente 49 m². Cabe

recalcar que no será una planta de tratamiento de gran tamaño y que gran parte del espacio requerido se debe a la longitud de la tubería a ocupar. A continuación, se muestra en la Figura 61 un esquema de cómo van a estar ubicadas las unidades para el prediseño del sistema de tratamiento para el agua de riego.

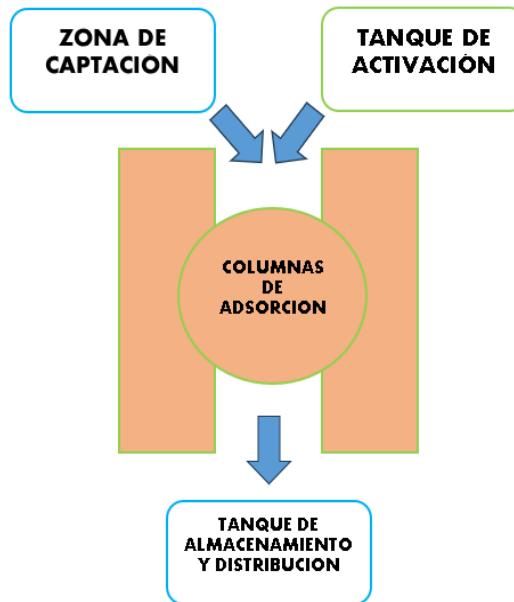


Figura 61. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento propuesto

Fuente: Autores

5.6 Tanque de Activación

El tanque de activación está diseñado para almacenar y dosificar la solución activadora, la cual, en este caso, es una solución básica de hidróxido de sodio (NaOH) ajustada a un pH de 11,5. Su función principal es proporcionar las condiciones químicas necesarias para la activación inicial del tanque de adsorción, optimizando así su capacidad de adsorción en el proceso de tratamiento del agua dura.

Una vez el material oxídico se haya saturado dentro de las columnas de adsorción y por ende su eficiencia se vea reducida, se continuará con el proceso de lavado, reactivación, lavado de exceso y reutilización del mismo. El cual consta de los siguientes pasos.

- **Lavado del Material Litológico Oxídico (MLO):** El proceso de lavado del MLO consiste en hacer circular un volumen de agua filtrada (destilada) a través del lecho de adsorción, con el objetivo de eliminar los iones adsorbidos durante su funcionamiento operativo. Este procedimiento es esencial para preparar el material antes de su reactivación. Se recomienda realizar el lavado entre 2 y 3 veces para asegurar la completa remoción de las especies iónicas adsorbidas.
- **Reactivación del MLO:** Una vez completado el lavado, el MLO se somete a un proceso de

reactivación. Este proceso implica llenar las columnas de adsorción con la solución activadora, permitiendo que el material repose durante un período mínimo de 24 horas.

- **Lavado del Exceso de Solución Activadora en el Material Adsorbente:** Consiste en la eliminación del exceso de solución activadora (SA) que queda retenida en el lecho adsorbente tras la etapa de activación. Este procedimiento debe repetirse de manera controlada para asegurar la completa remoción de cualquier residuo de la solución activadora, garantizando así que el material adsorbente esté adecuadamente preparado para su posterior uso.
- **Reutilización de la Solución Activadora (SA):** Después de la activación del MLO, la solución activadora utilizada es recirculada al tanque de activación a través de una bomba de agua. En este punto, se ajusta el pH de la solución para garantizar que esté en condiciones óptimas para futuras reactivaciones del MLO.

5.7 Columnas de Adsorción

Las columnas del sistema operarán mediante un proceso de adsorción, donde el material que hará de medio adsorbente se colocará en el interior de cada columna, a través de las cuales fluirá el agua de riego. El sistema propuesto constará de dos columnas de adsorción, las cuales funcionarán en distintas fases o etapas que se describen a continuación.

5.8 Etapas del Proceso de Adsorción

5.8.1 Preparación de la Columna

Dentro de la columna de adsorción se aplicará una malla metálica que cumplirá dos funciones ayudar al correcto esparcimiento del material adsorbente y también evitará problemas de taponamientos y atascos a la salida de la columna.

5.8.2 Empaquetamiento de la Columna

Se introduce el material adsorbente intentando que este se esparza correctamente por el diámetro de la columna evitando la formación de bolsas de aire y abultamientos.

5.8.3 Acondicionamiento del Material Adsorbente

En esta etapa, se procede a la activación del lecho de adsorción mediante el contacto con una solución básica activadora. Para cada columna de adsorción, se utiliza un volumen aproximado de 2426 litros de dicha solución, asegurando la completa impregnación del material adsorbente y su preparación para el proceso de tratamiento.

5.8.4 Etapa de Funcionamiento

En esta etapa se lleva a cabo el proceso de adsorción de los compuestos responsables de la

dureza, así como de los iones cloruro y sulfato presentes en el agua. Las condiciones operativas, tales como la velocidad de flujo y el tiempo de adsorción, serán previamente ajustadas para optimizar la eficiencia del sistema.

Cuando el material adsorbente comience a saturarse y su capacidad de adsorción disminuya significativamente, se procederá con las etapas de Lavado del Material Litológico Oxídico (MLO), Reactivación del MLO y Reutilización de la Solución Activadora (SA), previamente descritas, con el fin de permitir su posterior reutilización.

5.9 Tanque de Almacenamiento y Distribución

Esta unidad tendrá como función principal el almacenamiento del agua previamente tratada en las columnas de adsorción. El tanque estará conectado al sistema de distribución del ramal de riego, permitiendo que el agua sea suministrada de manera eficiente para su uso en el sector agrícola. El tratamiento previo del agua garantizará el correcto funcionamiento del sistema de riego en la comunidad, minimizando los riesgos asociados a la acumulación de sales y otros compuestos que podrían comprometer la infraestructura de riego.

Este tanque estará equipado de válvulas, tuberías de salida, desagüe y desborde ver (Figura 62).

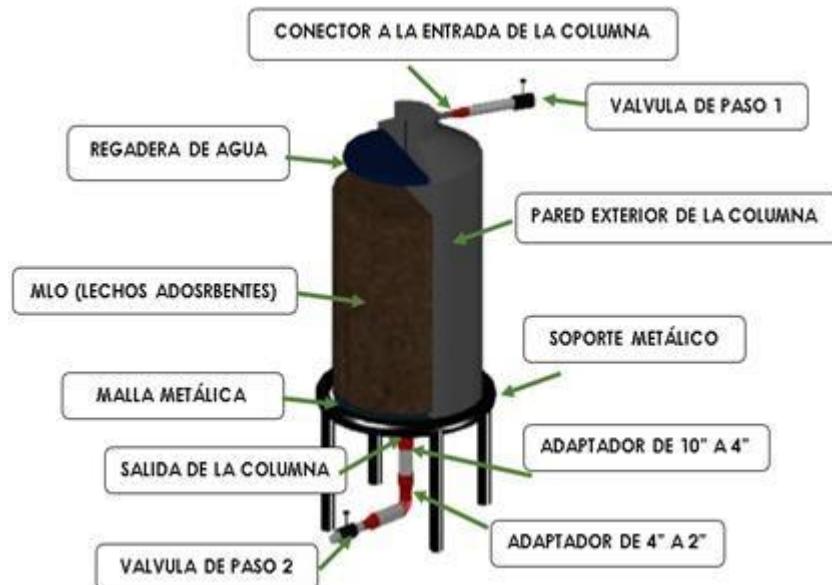


Figura 62. Esquema interno de la columna de adsorción

Fuente: Autores

5.10 Pre-Diseño de las Unidades del Sistema de Tratamiento del Agua de Riego

5.10.1 Bomba Periférica

Tiene la función de ayudar en la extracción de agua proveniente del tanque de captación ya existente. Para el correcto funcionamiento de este sistema se necesitarán 5 bombas periféricas que

estarán ubicadas a la entrada del agua cruda para las columnas, otra en la entrada y salida del agua del tanque de almacenamiento y distribución, y las otras 2 formarán parte del sistema de recirculación entre las columnas de adsorción y el tanque de activación. Estas bombas serán adquiridas comercialmente, según la disponibilidad en el mercado. En la Tabla 8 se muestran las características de los equipos recomendados.

Tabla 8. *Características de la bomba periférica*

Nombre	Modelo	Marca	Especificaciones	Foto
Bomba Periférica Agrícola (APM)	APM110-A	LEO	Potencia: 1,1 kW-1,5 HP Voltaje: 220 V Salida: 1" x 1" Flujo Max: 70 l/min Altura Max: 85 m succión Max: 8 m	

Fuente: Autores, adaptado de (Pintulac, s.f.)

5.10.2 Diseño y Escalado de las Columnas de Adsorción

Para el dimensionamiento de las columnas de adsorción se realizó un escalado basándose en las características y dimensiones a partir de las columnas experimentales usadas durante las pruebas de laboratorio y que se reporta en la Tabla 9.

Tabla 9. *Características de la columna usada en laboratorio*

Parámetros	Valor
Diámetro de la columna (m)	0,13
Diámetro de salida de la (m)	0,025
Altura de la columna (m)	0,57
Altura del lecho (m)	0,43
Masa del lecho absorbente (kg)	1,5
Caudal de la columna (L/h)	4,5
Densidad del lecho (kg/m³)	2000
Volumen del lecho (m³)	0,00075
Caudal de la columna de laboratorio (L/s)	4,5

Fuente: Autores

5.10.3 Procedimiento Para el Escalado de las Columnas

Para los cálculos de escalado de la columna se determinó la masa total del material adsorbente que se usará para la retención de los iones disueltos en el agua de riego. Realizando una reglade tres relacionando los litros filtrados durante las pruebas en laboratorios y la masa de lecho utilizada. Se estimó la capacidad volumétrica teórica de la columna tomando en cuenta el volumen de

agua filtrar durante el tiempo de riego.

El sistema constará de 2 columnas de adsorción que trabajan con la mitad del volumen total a tratar, tomando en cuenta este apartado la masa total que contendrá cada columna está definida por el siguiente procedimiento.

La masa del material filtrante que tendrá la columna se determina usando la ecuación (2).

$$M_{nl} = \frac{M_{lb} * V_{tf}}{V_{lb}} \quad (2)$$

Donde:

M_{nl} = Masa de nuevo lecho.

M_{lb} = Masa de lecho de la columna de laboratorio.

V_{tf} = Volumen de agua a filtrar.

V_{lb} = Volumen de agua filtrada de laboratorio.

El porcentaje teórico del lecho en la columna se obtendrá, usando la ecuación (3).

$$\%l = \frac{M_{nl} * 100}{V_c} \quad (3)$$

Donde:

$\%l$ = Porcentaje del lecho en la columna.

M_{nl} = Masa de nuevo lecho.

V_c = Capacidad de la columna de adsorción.

La masa de lecho real dentro de la de la columna se obtendrá, usando la ecuación (4).

$$Mr = Ct * \%lrc \quad (4)$$

Donde:

Mr = Masa de lecho nuevo real en la columna.

Ct = Capacidad de la columna de adsorción.

$\%lrc$ = Porcentaje de lecho recomendado en la columna.

El volumen del lecho que ocupara en la columna está dado por la ecuación (5).

$$V_l = \frac{M_{nl}}{\rho_l} \quad (5)$$

Donde:

V_l = Volumen del lecho en la columna.

M_{nl} = Masa de lecho nuevo real en la columna.

ρ_l = Densidad del lecho.

5.10.4 Pre-Dimensionamiento de las Columnas

El cálculo para el dimensionamiento de una columna se aplica de forma análoga para la segunda, dado que ambas operan bajo las mismas condiciones y parámetros de diseño. Este procedimiento garantiza que ambas columnas mantengan una capacidad de tratamiento equilibrada, asegurando la eficiencia del sistema.

Para la columna de adsorción la masa total del lecho se obtuvo resolviendo la ecuación (2), donde se asumió 1,5 kg de masa utilizada en laboratorio, el volumen a tratar es de 8820 L y el volumen usado en laboratorio fue de 12 litros.

$$M_{nl} = \frac{M_{lb} * V_{tf}}{V_{lb}} \quad (2)$$
$$M_{nl} = \frac{1,5 \text{ kg} * 8820 \text{ L}}{12 \text{ L}}$$

$$M_{nl} = 1102,5 \text{ kg}$$

Teniendo el valor de masa de lecho a utilizar en cada columna se sugiere utilizar una tolva industrial de 1300 litros (kg) de capacidad, la cual se pude adquirir comercialmente y su disponibilidad está en el mercado, esta tolva actuará como la columna de adsorción.

Posteriormente se calcula el porcentaje teórico que ocupara el lecho dentro de la columna resolviendo la ecuación (3).

$$\%l = \frac{M_{nl} * 100}{V_c}$$

$$\%l = \frac{1102,5 \text{ kg} * 100}{1300 \text{ kg}}$$

$$\%l = 84,8 \%$$

De acuerdo con Gonzales (2016), se recomienda que la masa efectiva del lecho adsorbente corresponda al 70% de la capacidad total de la columna. Con base en esta premisa, se procedió

a resolver la ecuación (4).

$$Mr = Ct * \% lrc \quad (4)$$

$$Mr = 1300 \text{ kg} * 0,70$$

$$Mr = 910 \text{ kg}$$

Finalmente se realizó el cálculo del volumen del lecho que ocupara en la columna de adsorción, mediante la ecuación (5).

$$V_l = \frac{M_{ln}}{\rho_l} \quad (5)$$

$$V_l = \frac{910 \text{ kg}}{2000 \text{ kg/m}^3}$$

$$V_l = 0,043 \text{ m}^3$$

Se sugiere un caudal de filtración en la columna de 0,245 L/s (882 L/h).

En la Tabla 10 se muestra el resumen de los cálculos efectuados.

Tabla 10. Resumen del cálculo para los valores a considerar

Parámetros	Valor
Masa del lecho absorbente (kg)	1102,5
Masa del lecho real a ocupar	910
Caudal de la columna sugerido (L/h)	882
Densidad del lecho (kg/m³)	2000
Volumen del lecho (m³)	0,43

Fuente: Autores

En la Tabla 11, se adjunta la información de las características del equipo sugerido para su adquisición y que se ajusta a los cálculos anteriores.

Tabla 11. Características de la tolva sugerida como columna de adsorción

Parámetro	Valor	Imagen
Altura (m)	1,87	
Diámetro (m)	1,10	
Diámetro de salida (m)	0,25	
Diámetro de la tapa (m)	0,45	
Ángulos (grados)	45	
Peso (kg)	29	
Capacidad (L)	1300	

Fuente: Autores, adaptado de (*Pintulac, s.f.*)

Como se puede observar en la Tabla 11, las dimensiones del equipo sugerido se ajustan a los valores mostrados en la Tabla 10, es decir, cada tolva será utilizada como una columna de adsorción y en su interior se ubicarán los 910 kg de lecho nuevo, así mismo con un caudal de trabajo de 882 L/h al final de las 10 hora de riego que efectúa la comunidad, se tratarán 8,820 litros por columna, y al utilizar dos columnas en paralelo, se obtendrá los 17,640 litros establecidos.

Se propone la instalación de este sistema al inicio de cada ramal del sistema de riego, con el objetivo de adsorber un volumen mensual de 211,680 m³ de agua. Esta disposición permitirá un tratamiento eficiente del flujo total de agua antes de su distribución en las áreas agrícolas.

5.10.5 Tanque de activación del material adsorbente

Siguiendo la pauta de que las unidades que forman parte del sistema sean adquiridas comercialmente en el mercado local, tomando en cuenta las necesidades del sistema, así como su durabilidad en el tiempo, se realizó la elección del tipo de tanque comercial que más se justa al diseño planteado.

5.10.6 Procedimiento para el escalado del tanque de alimentación

Para el escalado del tanque de activación se toma en cuenta las características de la columna usada en las pruebas de laboratorio y el volumen de la solución activadora (NaOH), con esta información se realiza un escalado de las características de laboratorio al tamaño real que se ajusta a las cantidades y dimensiones anteriormente mencionadas, el procedimiento a seguires:

Determinar el volumen de la solución activadora con la ecuación (6).

$$V_{ta} = \frac{M_r * V_{lab}}{M_{lab}} \quad (6)$$

Donde:

V_{ta} = Volumen de activación en el tanque.

V_{lab} = Volumen de activación en el laboratorio.

M_r = Masa de lecho nuevo real en la columna.

M_{lab} = Masa de lecho en laboratorio.

En la Tabla 12 se muestran los datos utilizados y se reporta el resultado de la ecuación (6).

Tabla 12. Datos para el escalo del Tanque Activación

	Masa del lecho en la columna (kg)	Volumen de activación en (L)
Condiciones de laboratorio	1,5	4
Datos en condiciones reales	910	4853,3

Fuente: Autores

$$V_{ta} = \frac{M_{ln} * V_{lab}}{M_{lab}} * L$$

$$V_{ta} = \frac{910 * 4}{1,5} * 2 = 4853,3L$$

5.10.7 Resultados del Pre-Dimensionamiento del Tanque

Una vez establecido el volumen necesario en el tanque de activación, se elige un tanque de acceso comercial que cumpla con la capacidad y que las condiciones de durabilidad.

En la Tabla 13 se reportan las características de la unidad seleccionada.

Tabla 13. Características del tanque de activación seleccionado comercialmente

Parámetro	Valor	Imagen
Altura (m)	1,77	
Diámetro (m)	2,20	
Vida Útil (años)	45	
Color	Blanco	
Capacidad (L)	5000	

Fuente: Autores

El Tanque de 5000 litros, de la marca Rotoplas, es ideal para el diseño propuesto ya que al ser fabricado en HDPE 100% Virgen de una pieza, es resistente y puede ser usado para el almacenamiento de agua, alimentos y sustancias químicas corrosivas además de ofrecer una

larga vida útil, además de proteger a las sustancias de la radiación UV y de los factores ambientales del entorno.

5.10.8 Tanque para el Almacenamiento de agua cruda.

Al estimar que por cada día de riego se gasta un aproximado de 17,64 m³ de agua, se recomienda implementar un tanque de almacenamiento industrial fabricado en polietileno de una capacidad de 20 m³ ya existente en el mercado.

En la Tabla 14 se muestra las características de diseño que presenta este tanque.

Tabla 14. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento

Parámetro	Nomenclatura y Unidades	Valor
Volumen de acumulación	$V_A(m^3)$	17,64
Volumen de extracción	$V_E(m^3)$	0,00049
Volumen del tanque	$V(m^3)$	20
Diámetro	$D(m)$	2,67
Altura	$H(m)$	4,20

Fuente: Autores

En la Figura 63, se muestra un plano de las dimensiones del tanque de captación y distribución.

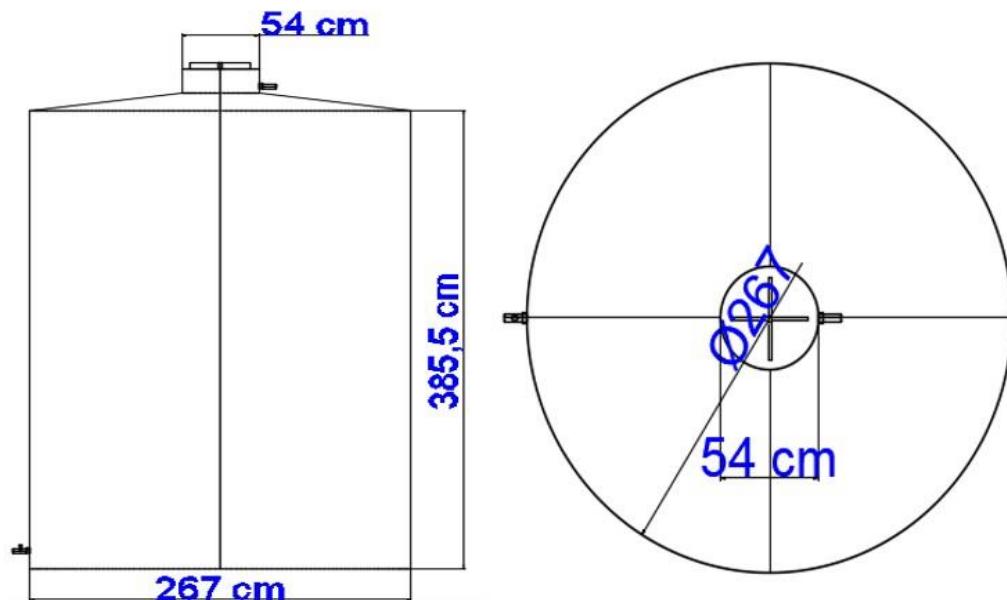


Figura 63. Dimensiones del tanque de captación

Fuente: Autores

5.10.9 Sistemas de Válvulas de Compuertas

Para completar el Prediseño del sistema de tratamiento de agua de riego para la comunidad La Primavera, es fundamental la instalación de un sistema de válvulas que permita controlar las distintas etapas operativas descritas en este capítulo. Estas válvulas garantizan un funcionamiento eficiente del sistema y previenen posibles problemas operativos.

El número total de válvulas requerido es de 13, distribuidas de la siguiente manera:

- La válvula (1) controlará la distribución del agua proveniente del tanque de almacenamiento de agua cruda existente en la comunidad.
- Las válvulas (2) y (3) regularán el flujo del agua cruda hacia las columnas de adsorción, mientras que las válvulas (8) y (7) controlarán el suministro de la solución básica de NaOH proveniente del tanque de activación.
- Las válvulas (4) y (5) gestionarán la salida del agua tratada desde las columnas de adsorción hacia el tanque de distribución, controlando el caudal de salida. Las válvulas (9), (6), (12) y (13) actuarán como válvulas de drenaje, permitiendo la eliminación de agua en caso de ser necesario.
- Finalmente, la válvula (10) funcionará como un paso regulador entre el agua proveniente de la comuna (B) y la columna (A), hasta el tanque de distribución.

En la Tabla 15 se describen las características técnicas del tipo de válvula (llave) seleccionada.

Tabla 15. Características de la válvula de compuerta

Nombre	Características	Fotos
Válvula de compuerta (Llave de paso)	Adaptable a cualquier instalación de uso industrial, agrícola y doméstico. Resistente a la corrosión.	

Fuente: Autores

De acuerdo al proceso que el sistema de tratamiento este ejecutando las llaves se abrieran o cerraran según corresponda para asegurar un flujo de agua homogéneo o en caso de saturación del material iniciar el proceso de reactivación y recirculación.

En la Figura 64, se muestra un esquema general de la vista superior de la propuesta del diseño del Sistema de Tratamiento del agua de riego de la comunidad La Primavera.

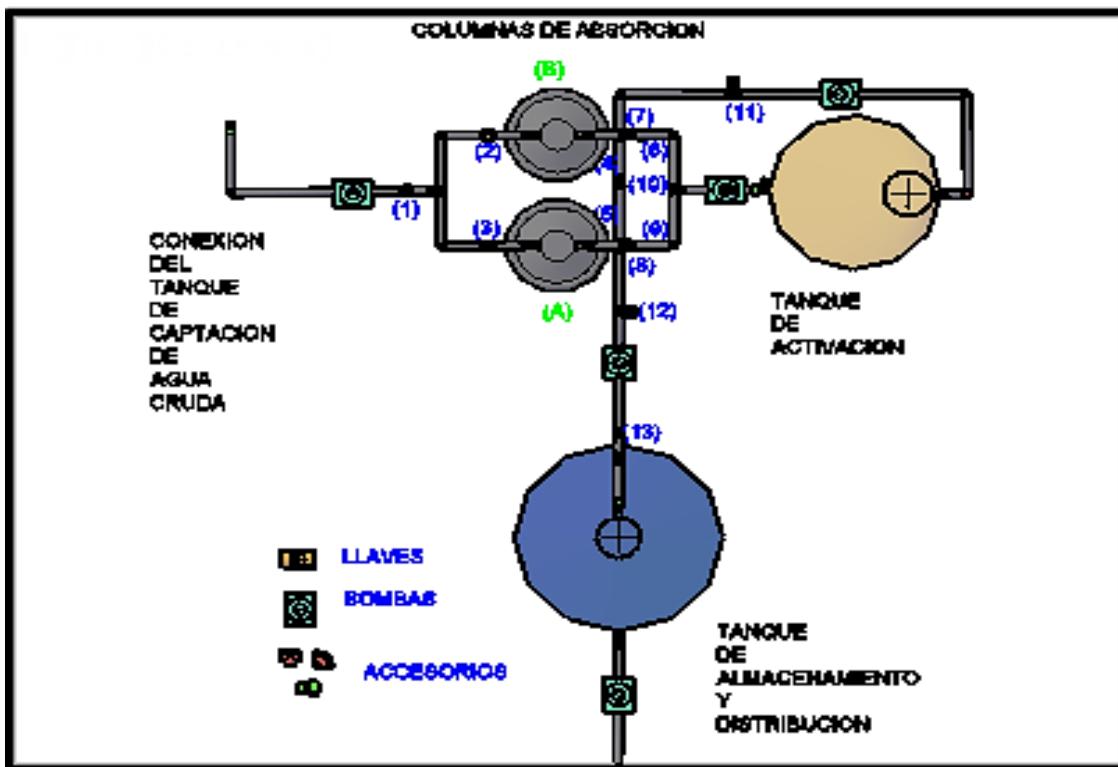


Figura 64. Esquema del Diseño del Sistema de Tratamiento de Agua para Riego en la Comunidad La Primavera

Fuente: Autores

En la Figura 65. Se muestra la representación final del Sistema de Tratamiento del agua de riego de la comunidad La Primavera.

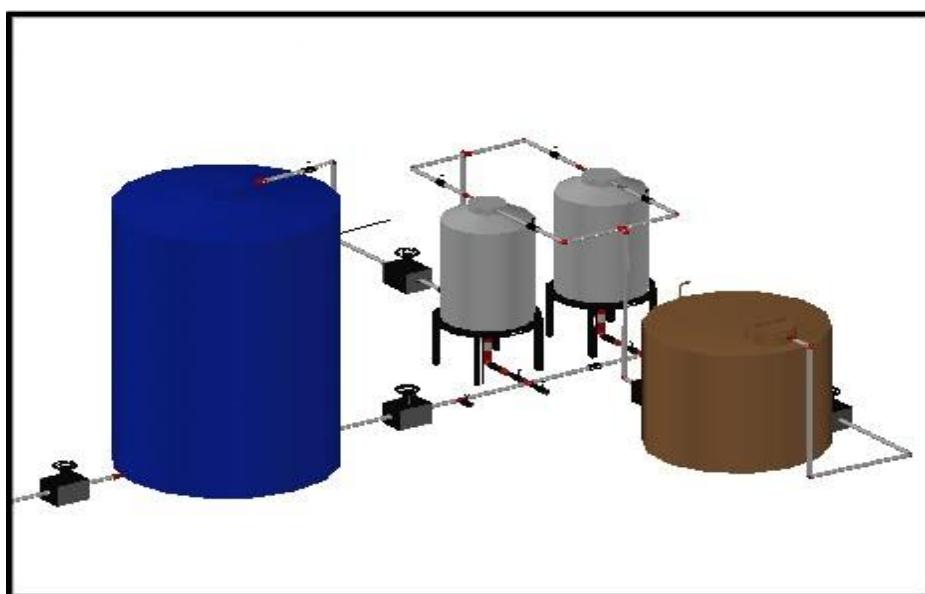


Figura 65. Sistema de tratamiento por adsorción

Fuente: Autores

Finalmente, al ajustar los cálculos de las dimensiones que van a formar parte del Sistema de Tratamiento por adsorción a unidades que ya existen y que se pueden adquirir comercialmente en mercados especializados, a continuación, se muestra en la Tabla 16 información relacionada al precio final que tendrá el sistema propuesto. Tomando en cuenta el precio en el mercado local y su viabilidad.

Tabla 16. Costo estimado del sistema de Tratamiento por adsorción

Concepto	Capacidad	Cantidad	Precio unitario (\$)	Costo Final(\$)
Tanque cilíndrico plástico (Polietileno)	2000 (L)	2	2300	4,600
Tanque plástico HPDE	5000 (L)	1	892	892
Tolvas Plásticas	1300 (L)	2	300	500
Bombas periféricas Agrícolas ATM	Potencia: 1,1 kW- 1,5HP	5	47,84	239,2
Válvulas de Compuerta	2 pulgadas	13	3,28	42,64
Codos 90 ^a	2 pulgadas	16	0,69	11,04
Uniones en T	2 pulgadas	5	1,11	5,55
Tuberías PVC	2 pulgadas	24 m	12,94 (6 m)	50,56
Tubos reductores	10 a 3 pulgadas	2	26,4	52,8
Tubo reductor	3 a 2 pulgadas	2	1,47	2,94
Tubo reductor	3 a 1½pulgada	3	0,56	1,68
Total				6541,74

Fuente: Autores

Al precio final obtenido se le tendría que sumar el precio de la fabricación del lecho que de poder industrializar el proceso descrito en la metodología sería muy bajo en comparación con los filtros ofrecidos en el mercado.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- A partir de los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica del agua de riego en la comunidad La Primavera, se concluye que el principal problema del sistema de regadío es la presencia de iones responsables de la dureza del agua. Estos iones afectan negativamente a los equipos y accesorios del sistema, generando taponamientos y atascamientos.
- Los ensayos de adsorción evidencian que la opción más eficiente para la remoción de dureza del agua es la utilización de lechos activados con NaOH, mientras que, para la eliminación de sulfatos, los lechos activados con HCl han demostrado ser la opción más adecuada. Sin embargo, debido a que la dureza es la principal problemática es recomendable emplear lechos adsorbentes activados con una solución básica de NaOH a un pH de 11,5.
- El diseño del sistema fue ajustado de acuerdo con las necesidades específicas de la comunidad y la disponibilidad de componentes y accesorios en el mercado local. De esta manera, se ha priorizado el uso de insumos de fácil acceso en el país, evitando la necesidad de diseñar piezas únicas o personalizadas que, en caso de fallos, podrían no ser reemplazables fácilmente.
- El diseño del sistema de tratamiento propuesto cumple con los objetivos planteados, logrando teóricamente la remoción eficiente de iones disueltos en el agua mediante la adsorción en lechos activados. Este sistema se presenta como una solución viable, económica y de larga duración, lo que lo convierte en una iniciativa ideal para el tratamiento de este tipo de problemáticas en zonas rurales con recursos limitados, beneficiando tanto a comunidades como a pequeñas empresas.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar una capacitación con los habitantes de la comunidad La Primavera acerca del funcionamiento y mantenimiento del sistema de tratamiento propuesto. Esto permitirá aclarar posibles dudas, garantizar una correcta operación del sistema y evitar inconvenientes futuros derivados de un mal uso o falta de conocimiento.
- Para la fabricación de los lechos adsorbentes, se recomienda promover la participación comunitaria a través de mingas, hasta que se logre la capacidad de industrializar el proceso. Esta estrategia no solo contribuirá a la sostenibilidad del proyecto, sino que también fortalecerá el sentido de propiedad y responsabilidad de la comunidad sobre el sistema.
- Se aconseja llevar a cabo un monitoreo anual del sistema de riego equipado con el diseño propuesto, con el fin de evaluar el estado de la calidad del agua y el grado de satisfacción de los usuarios. Esto permitirá realizar ajustes oportunos y garantizar que el sistema continúe cumpliendo con sus objetivos a largo plazo.
- Se recomienda realizar investigaciones adicionales en otros contextos, donde el agua contenga contaminantes distintos. Esto permitiría expandir el uso del sistema y, eventualmente, desarrollar una patente que lo haga aplicable en una variedad de escenarios, beneficiando a más comunidades con problemas de calidad de agua.

BIBLIOGRAFÍA

Auquilla, J.C., Ramos, D. y Prato, J.G. (2023). *Estudio del equilibrio de adsorción de la dureza del agua sobre Arcilla roja y café de la región de Pastaza [Tesis de grado]*. Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba. Ecuador. Repositorio Digital UNACH. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/11120>

Arias Gómez, J., Villasís keever, M.Á., & Miranda, M.G. (2021). Mesotelioma y ocupación. revisión de casos en uruguay: 2002-2014. Anales de La Facultad de Medicina, 8(2). <https://doi.org/10.25184/anfamed2021v8n2a9>

Babel, S.; & Kurniawan, T.A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review. Journal of Hazardous Materials, 97(1-3), 219-243.

Bomba de agua periférica 1/2 HP LEO agrícola. Pintulac. Recuperado de <https://www.pintulac.com.ec/bomba-de-agua-periferica-1-2hp-leo-agricola.html>

Calvo, M.J.M. (2017). Evaluación del proceso de adsorción de tres tipos de carbón activado granular para una fuente de agua superficial. Universidad de Los Andes.

Campaña, J.M., Torres, E.J. y Prato, J.G. (2024). Evaluación del equilibrio de adsorción de la dureza del agua sobre arcilla de Santa Teresa [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba. Ecuador. Repositorio Digital UNACH. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12826>

Constitución de la República del Ecuador. (2008). Montecristi, Ecuador.

Demin, P. (2014). Métodos de riego : fundamentos , usos y adaptaciones. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 1-24. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_aportes_para_el_mejoramiento_del_manejo_de_los_sistemas_de_riego.pdf

Fernández Cirelli, A. (2017). Ambiente. Travessia - Revista Do Migrante, 81. <https://doi.org/10.48213/travessia.vi81.866>

Fuentes, J.L. (2017). Aguas Subterráneas. Journal of Chemical Information and Modeling, 110(9), 1689–1699.

González, M. A. G., Israde, M. R. R., & Guerra, D. R. V. (2012). Universidad Autónoma del Estado de México. 12, 8–9.

http://veterinaria.uaemex.mx/_docs/61_ARCH0_PRACTICAS_DE_TERAPEUTICA_QUIRURGICA.pdf

Hernández, JJ. (2016). Evaluación de la capacidad de adsorción e intercambio iónico de suelos del estado de Mérida para la depuración en aniones disueltos en aguas naturales. Universidad Nacional Abierta, 66.

INEC. (2018). Análisis de la disponibilidad de agua potable en zonas rurales de Ecuador. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Quito. Ecuador.

INEN. (2020). NTE INEN 1108. Guías para la calidad del agua potable. Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1–10.

Jiménez, J. (2012). Manual de métodos de sistemas de riego. Suna, 26.

<https://fundacionsuna.org/wp-content/uploads/PDF/Jaime-Lamo/MANUAL-MÉTODOS- DE-SISTEMAS-DE-RIEGO.pdf>

Luján Esparza, A. (2015). Ablandamiento de Agua con Adsorbentes Modificados Químicamente. En Noviembre (Vol. 151).

Millán, F., Prato, J., González, L., Márquez, A., & Djabayán, P. (2019). Cu (II) Chemisorption on Calcined Substrates made with an Oxidic Refractory Variable Charges Lithological Material. 42(1). <https://doi.org/10.22209/rt.v42n1a02%0A>

Millán, F., Prato, J., López, M., & López, L. (2009). Estudio de la retención de iones de calcio por materiales térmicamente modificados provenientes de suelos de la región de San Juan de Lagunillas, estado Mérida, Venezuela. Revista Técnica de Ingeniería Universidad de Zulia, 32, 48-54.

Ministerio del Ambiente. (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. *Registro Oficial No. 387, Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua*, 1–40. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>

Mora-Alvarado, D.A.: Portuguez-Barquero, C.F.; Alfaro-Herrera, N.; & Hernández- Mirault, M. (2015). Diferencias de dureza del agua y las tasas de longevidad en la Península de Nicoya y los otros distritos de Guanacaste TT - Differences water hardness and longevity rates in the Peninsula of Nicoya of Guanacaste and the other districts. Revista Tecnología EnMarcha, 28(3), 3–14.

Morales Vallejo, P. (2013). Investigación experimental, diseños y contraste de medias. Estadística Aplicada a Ciencias Sociales, 85. <http://web.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/DiseñosMedias.pdf>

Neira Gutiérrez, M.A. (2006). Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile. Universidad de Chile, 83. http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2006/neira_m/sources/neira_m.pdf

Ortiz, C.A., Vásconez, R.L.; y Prato, J.G. (2019). Reducción de la dureza cárlica empleando lechos de adsorción con rocas volcánicas del Cotopaxi y El Altar [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba. Ecuador. Repositorio Digital UNACH. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/5805>.

Prato, J.G.; Millán, F.; Ríos, A.; & González-Ramírez, L.C. (2022). Uso de materiales litológicos oxídicos para la reducción de la dureza en aguas naturales. Información Tecnológica, 33(2), 145–156. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000200145>

Prato, J.G.; González Ramírez, L.C.; Pérez, M.C.; Rodríguez, M.E. (2021). Adsorción de la dureza del agua sobre lechos de rocas volcánicas de Ecuador. Información Tecnológica 32(2), 51-60. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000200051>.

Prato, J.G.; Millán, F.; Senila, M.; Levei, E.A.; Tánaselia, C.; González, L.C.; Ríos, A.C.; Sagñay Yasaca, L.; Dávalos, G.E. (2024). Chemical and Physical Characterization of Three Oxidic Lithological Materials for Water Treatment. Sustainability 16, 7902. <https://doi.org/10.3390/su16187902>.

Pávez, A., Saldaña, G., Prato, J.G. (2023). Efecto del pH sobre el equilibrio de adsorción de la dureza del agua sobre arcilla roja de la región Pastaza [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba. Ecuador. Repositorio Digital UNACH. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10955>

Quito -Ecuador, Q.-E.; & Primera Edición, P.E. (1998). Instituto Ecuatoriano De Normalización <https://es.scribd.com/document/440903071/NTE-INEN-111>

Rice, E.W.; Baird, R.D.; Eaton, A.D. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed.; American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation: Washington, DC, USA.

Santos, V., Silva, M.; & Ramírez, R. (2020). Application of low-cost clay adsorbents for water treatment. Water Research, 181, 115941.

- Sawyer, C.N.; McCarty, P.L.; y Parkin, G.F. (2003). Chemistry for Environmental Engineering and Science. 5ta ed. McGraw-Hill. New York.
- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), 35. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
- Truque, P. A. (2013). Armonización de los estandares de agua potable en las Americas. *Armonizacion De Los Estandares De Agua Potable En Las Americas*, 1(1), 17.
- UNESCO. (2017). Water for Sustainable Development. UNESCO Publishing.
- Worch, E. (2012). Adsorption Technology in Water Treatment. In *Adsorption Technology in Water Treatment*. <https://doi.org/10.1515/9783110240238>
- World Bank. (2020). Water in Agriculture. World Bank Group.
- World Health Organization (WHO). (2019). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organization. Pintulac.

ANEXOS

Anexo 1. Recolección del Material Litológico Oxídico y del Agua de Riego



Figura 66. Recolección de arcilla



Figura 67. Recolección de muestras de agua

Anexo 2. Dimensionamiento del Tanque de Captación



Figura 68. Medición del largo del tanque



Figura 69. Medición del ancho del compartimiento

Anexo 3. Medición de Parámetros Fisicoquímicos del Agua de Riego



Figura 70. Medición de concentraciones



Figura 71. Medición del pH y temperatura

Anexo 4. Equipos Empleados en el Desarrollo de la Tesis

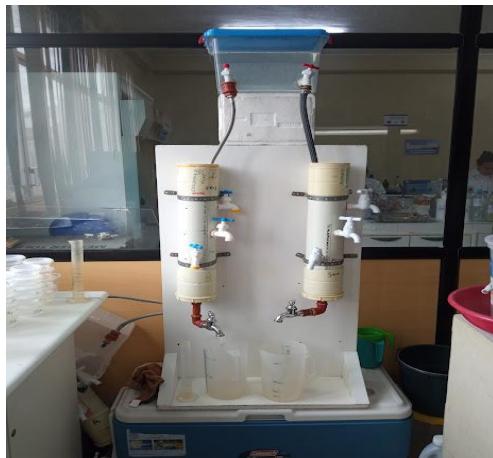


Figura 72. Columnas de Adsorción



Figura 73. Turbidímetro portátil 2100Q



Figura 74. Tamiz vibratorio para laboratorio



Figura 75. Tamizadores de 250, 150 y 75 μm



Figura 76. Mufla Thermolyne de 1700 $^{\circ}\text{C}$



Figura 77. Mufla Horno BIOBASE de 1200 $^{\circ}\text{C}$



Figura 78. Espectrofotómetro portátil HACH



Figura 79. Balanza de Precisión ADAM



Figura 80. Potenciómetro Mettler-Toledo



Figura 81. Conductímetro Mettler-Toledo



Figura 82. Multímetro portátil HQ40D



Figura 83. Medidor de pH SPER SCIENTIFIC

Anexo 5. Resultados Comparativos de la Adsorción de Iones de Dureza

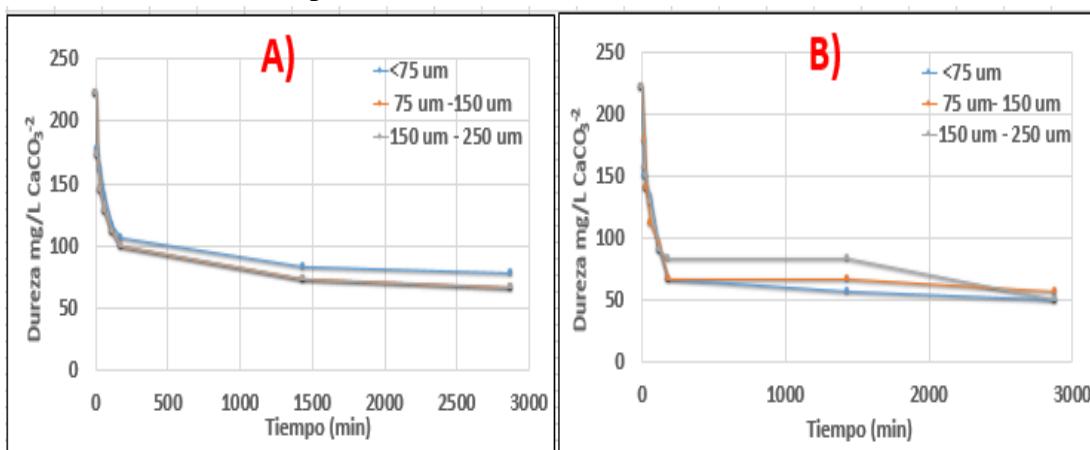


Figura 84. Equilibrio de adsorción de la dureza con lechos básicos

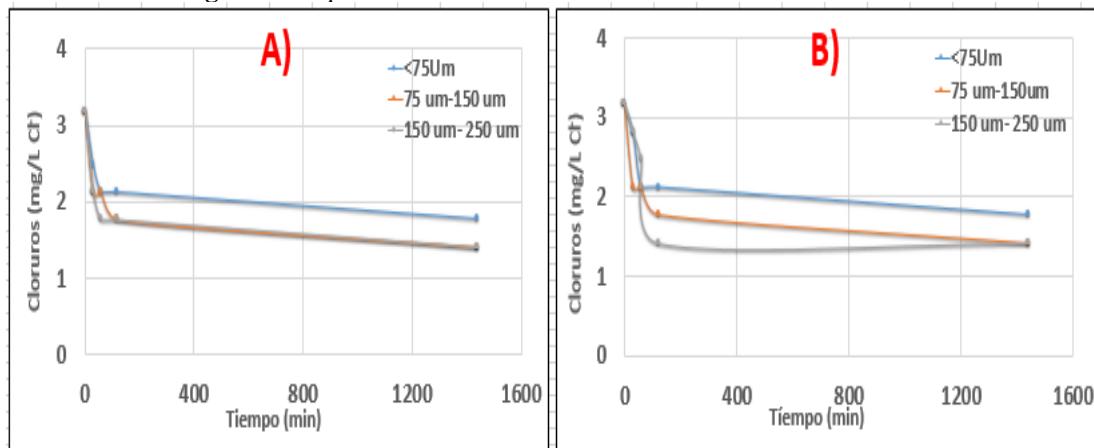


Figura 85. Equilibrio de adsorción de los cloruros con lechos básicos

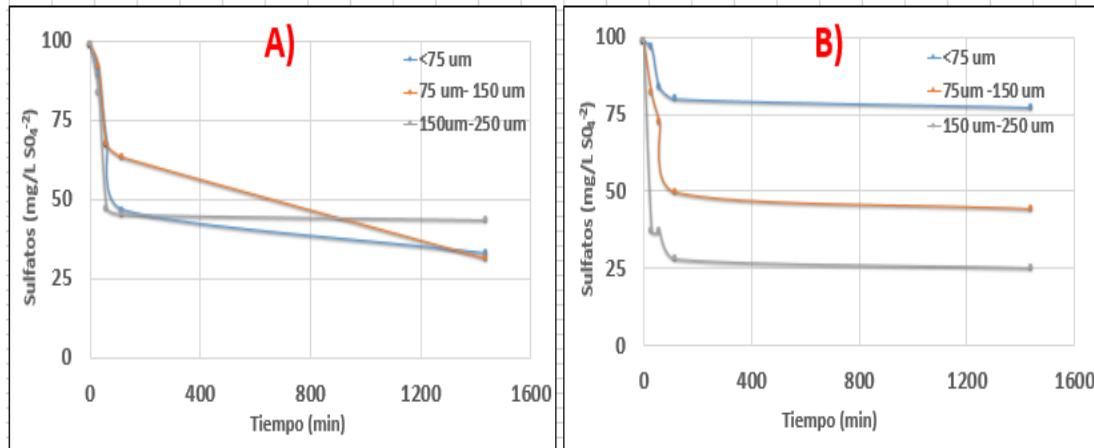


Figura 86. Equilibrio de adsorción de los sulfatos con lechos básicos

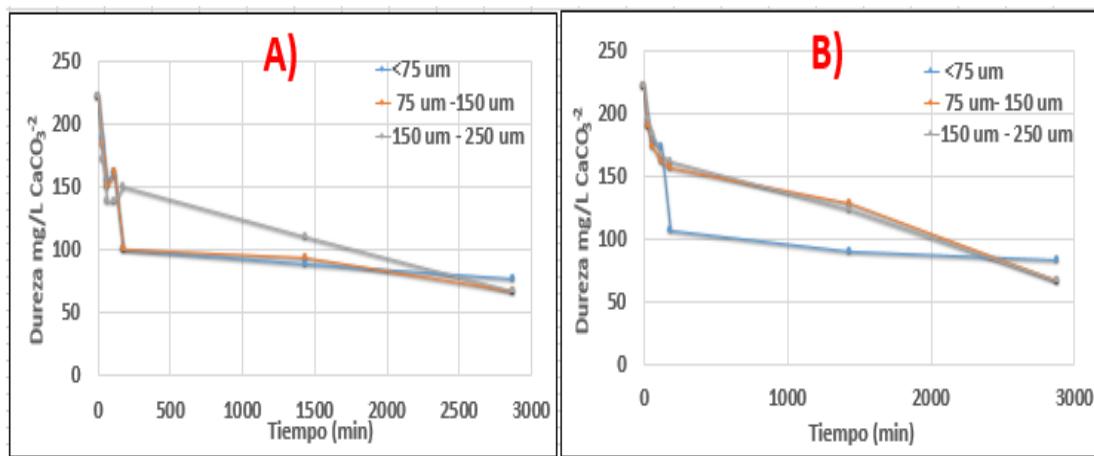


Figura 87. Equilibrio de adsorción de la dureza con lechos ácidos

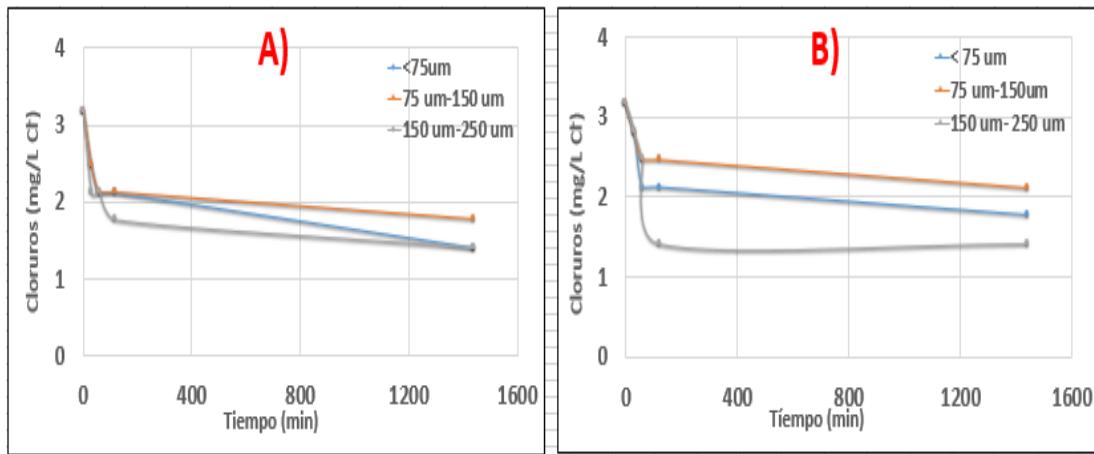


Figura 88. Equilibrio de adsorción de la dureza con lechos ácidos