

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE DUREZA
DEL AGUA EN LA EMPRESA COSMOGREEN S.A.S CÚCUTA- NORTE DE
SANTANDER**

Trabajo presentado para optar el título de Ingeniero Químico por:

ANDRÉS FELIPE QUINTANA PABÓN



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA
PAMPLONA, COLOMBIA
2019**

*DESARROLLO DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE DUREZA
DEL AGUA EN LA EMPRESA COSMOGREEN S.A.S CÚCUTA- NORTE DE
SANTANDER*

ANDRÉS FELIPE QUINTANA PABÓN

Proyecto de pasantía presentado como requisito parcial para optar por el título de:
Ingeniero Químico

Director:

JACQUELINE CORREDOR ACUÑA

Ingeniera Química, MSc Dra

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
PAMPLONA, COLOMBIA

2019

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis agradecimientos por el apoyo y comprensión de mi familia, por creer y confiar siempre en mí, por todo el sacrificio y esfuerzo que me han brindado.

A mi tutora de trabajo de grado, Jacqueline Corredor por su orientación, dedicación, disponibilidad y por todas sus enseñanzas durante el desarrollo del presente proyecto.

A la empresa Cosmogreen S.A.S por haberme acogido en sus instalaciones y confiar en mi para el desarrollo del proyecto. De igual forma, al gerente Francisco Márquez y Carolina Moros que hicieron que todo esto fuera posible.

A los ingenieros: Daniel Moros y Alejandra Cruz por su orientación y dedicación en el desarrollo de este proyecto y por compartir sus conocimientos en todo lo que he necesitado.

A la Universidad de Pamplona y a todo el personal docente y de laboratorio por su colaboración y enseñanza para mi formación profesional y personal

Por último, agradecer a mis amigos: Jank, Andres, Javier, Camilo y Diego que siempre han estado apoyándome todo el tiempo.

RESUMEN

Este proyecto tuvo como objetivo mejorar el sistema de filtración en la empresa Cosmogreen S.A.S, ubicada en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, con el fin de remover la dureza del agua. La empresa capta el recurso hídrico, de un pozo subterráneo que tiene una calidad de dureza muy alta y no se ajusta a los parámetros para la preparación de detergentes. El sistema de filtrado consta de 3 filtros de intercambio iónico compuesto por resina catiónica regenerados con salmuera, el actual proceso que tenía la empresa no lograba ajustar la calidad del agua a las condiciones requeridas para el proceso.

Por lo tanto, para el logro del proyecto, se realizó la evaluación del sistema de filtrado en serie, mediante análisis fisicoquímicos, de dureza total, sólidos suspendidos, pH, conductividad, turbidez, demanda bioquímica de oxígeno y capacidades de intercambio, planteando dos sistemas de filtrado que ayudan al sistema de filtrado en serie. El primer sistema planteado consta de un pre-filtrado con adición de cal, donde se determinó la concentración óptima evaluando las propiedades fisicoquímicas de dureza, sólidos suspendidos, pH, conductividad y turbidez, luego de la precipitación. El segundo sistema de filtrado consta de la variación de los filtros a paralelo, trabajando individualmente para así mejorar los tiempos de filtración, evaluando las propiedades fisicoquímicas del agua y estableciendo la capacidad, también se determinaron los tiempos de filtrado y el tiempo de regeneración, asimismo como la concentración óptima del regenerante.

Con la implementación del sistema de pre-filtrado, se pudo disminuir la dureza del agua un 39% siendo una solución viable para ayudar al sistema de filtrado, en caso de que se requiera un mayor volumen de filtrado. Para el segundo sistema de filtración se aumentó la producción de agua de 6000 L a 15000 L manteniendo los estándares de calidad requeridos por la empresa, así mismo, se mejoró el sistema de regeneración disminuyendo en un 68% el tiempo de lavado de cada filtro, adicionalmente se ajustó los volúmenes de reganarte logrando disminuir un 28% la sal usada para la regeneración de los filtros, siendo una mejora considerable para la economía de la empresa.

PALABRAS CLAVES: Dureza, carbonato de calcio, ciclo de filtrado, intercambio iónico, precipitado, resina

ABSTRACT

This project aims to improve the filtration system at Cosmogreen S.A.S, located in the city of Cúcuta, Norte de Santander, in order to remove water hardness. The company captures the water resource, from an underground well that has a very high hardness quality and does not conform to the parameters for the preparation of detergents. The constant filtering system of 3 ion exchange filters composed of cationic resin in series regenerated with brine, but the process that was successful in the company failed to adjust the hardness of the water to the quality conditions for the process.

Therefore, for the achievement of the project, the evaluation of the series filtering system was carried out, by means of physicochemical analysis, of total hardness, suspended solids, pH, conductivity, turbidity, biochemical oxygen demand and exchange capacities, considering two systems of filtering that helps the system in series filtering. The first system proposed consists of a pre-filtration with variations of lime, where the optimum concentration is determined by evaluating the physicochemical properties of hardness, suspended solids, pH, conductivity and turbidity, after concentration. The second filtering system, the position of the filters is varied in parallel, working individually to improve the filtration times, evaluating the physicochemical properties of the water and establishing the capacity, the filtering times and the regeneration time are also determined, directly as the optimal concentration of the regenerant.

With the implementation of the prefiltering system, water hardness could be reduced by 39%, being a viable solution to help the filtration system, in case a larger volume of filtering is required, for the second filtration system it was possible to increase water production from 6000 L to 15000 L Quality problems required by the company. Likewise, the regeneration system was improved by reducing the washing time of each filter by 68%. In addition, the registration volumes are adjusted, reducing the salt used for the regeneration of the filters by 28%, being a considerable improvement for the company's economy.

KEY WORDS: Hardness, Calcium carbonate, filtering cycle, Ionic exchange, precipitate, resin

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	II
ABSTRACT.....	III
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION	2
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
ANTECEDENTES	5
1. MARCO TEORICO.....	6
1.1 Características del agua	6
1.1.1 Agua:	6
1.1.1 Turbidez.....	8
1.1.2 Sólidos suspendidos totales	9
1.1.3 Color y materia orgánica	9
1.2 Sustancias químicas disueltas.....	10
1.2.1 Alcalinidad	10
1.2.2 Dureza del agua	11
1.3 Tratamiento de la dureza del agua	12
1.4 Procesos físicos para la dureza del agua.....	12
1.4.1 Evaporación- condensación.....	13
1.4.2 Ósmosis inversa.....	13
1.4.3 Nanofiltración	14
1.5 Procesos químicos para el ablandamiento de agua	15

1.5.1 Precipitación con exceso de cal.....	15
1.5.2 Precipitación con carbonato de sodio-cal.....	16
1.5.3 Precipitación con hidróxido de sodio	16
1.5.4 Recarbonatación	17
1.6 Intercambio Iónico.....	18
1.6.1 Resinas de intercambio iónico.....	20
1.6.2 Regenerante de resinas de intercambio iónico	22
2. DISEÑO METODOLÓGICO.....	24
2.1 Tipo de investigación.....	24
2.2 Población y muestra.....	24
2.3 Caracterización del recurso hídrico	25
2.4 Análisis físico-químico del agua captada.....	26
2.4.1 Análisis de dureza:.....	26
2.4.1.1 Preparación de los reactivos.....	26
2.4.1.2 Procedimiento de análisis de dureza.....	26
2.4.1.3 Cálculos del análisis de dureza	27
2.4.2 Análisis sólidos totales	27
2.4.2.1 Procedimiento de análisis de sólidos totales.....	27
2.4.2.2 Cálculos del análisis de sólidos totales	27
2.4.3 Análisis de pH	28
2.4.3.1 Procedimiento de análisis de pH	28
2.4.4 Análisis de conductividad.....	28
2.4.4.1 Procedimiento de análisis de conductividad.....	28
2.4.5 Análisis de Turbiedad.....	28
2.4.5.1 Procedimiento de análisis de turbiedad.....	28
2.4.6 Análisis de la demanda química de oxígeno	29

2.4.6.1 Procedimiento demanda química de oxígeno	29
2.4.7 Análisis de la demanda biológica de oxígeno.....	29
2.4.7.1 Procedimiento del análisis de la demanda biológica de oxígeno	29
2.5 Análisis de la demanda de agua para producción	30
2.6 Sistema de filtrado actual.....	30
2.6.1 Análisis físico-químico del sistema de filtrado actual	30
2.7 Selección de tecnología de tratamiento.....	34
2.8 Pre-filtrado del agua por precipitación con cal	34
2.8.1 Pruebas de jarras para precipitación con cal	35
2.8.2 Análisis de calidad de agua del Pre-filtrado	36
2.9 Filtrado de intercambio iónico	37
2.9.1 Análisis físico-químico del Sistema de filtrado paralelo	39
2.9.2 Producción y duración de ciclo	39
2.9.3 Capacidad del filtrado de intercambio iónico.....	40
2.9.3.1 Análisis de capacidad Operativa de los sistemas de filtrado	42
2.10 Lavado y Regeneración de filtro de intercambio iónico	43
2.10.1 Tiempo de regeneración	44
2.10.2 Concentración del regenerante.....	45
2.11 Análisis de datos	45
3. RESULTADOS Y ANALISIS.....	47
3.1 Análisis fisicoquímico del recurso hídrico	47
3.1.1 Características y condiciones de operación del pozo subterráneo.....	48
3.2 Análisis de la demanda de agua para producción	48
3.3 Caracterización del agua del sistema de pre-filtrado.	49
3.4 Análisis de los sistemas de filtrado.....	51
3.4.1 Resultados de la capacidad operativa del filtrado de intercambio iónico	54

3.4.2 Tiempo de regeneración	56
3.4.3 Resultado de la duración del ciclo	57
3.4.4 Producción de agua total	58
3.4.4 Concentración del regenerante.....	58
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXOS	68
ANEXO A: ESTUDIO DEL POZO SUBTERRANEO DE LA ZONA FRANCA	68
ANEXO B: EQUIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE pH Y CONDUCTIVIDAD:	76
ANEXO C: EQUIPO PARA EL ANALISIS DE TURIBIEDAD	77
ANEXO D: TERMOREACTOR PARA EL ANALISIS DQO	78
ANEXO E: ESPECTROFOTOMETRO	79
ANEXO F: BOTELLAS PARA ANALISIS DBO	80
ANEXO G: CAJA DE INCUBACION PARA DBO.....	81
ANEXO H: PRUEBAS DE JARRAS	82
ANEXO I: CAUDALIMETRO	83
ANEXO J: FICHA TECNICA RESINA L	84
ANEXO K: FICHA TECNICA RESINA PURIKOR	86
ANEXO L: CABEZAL PARA REGENERACION AUTOMATICO Y MANUAL	87
ANEXO M: ANALISIS ESTADISTICO POST HOC PARA REGENERANTE	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana	7
Tabla 2: Característica químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.	8
Tabla 3: Principales cationes que causan la dureza en el agua y los principales asociados con ellos.	11
Tabla 4: Índices de dureza del agua.	12
Tabla 5: Métodos de análisis de calidad de agua de pozo	25
Tabla 6 Producción actual y futura de la empresa Cosmogreen S.A.S	30
Tabla 7: Condiciones de la prueba de jarra.....	36
Tabla 8: Resultados de análisis fisicoquímico del recurso hídrico.....	47
Tabla 9: Características del pozo de Cosmogreen	48
Tabla 10: Demanda de agua para producción	49
Tabla 11. Análisis de Varianza (ANOVA) de la adición de cal en el pre-filtrado.....	50
Tabla 12. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas según la adición de cal en la etapa de pre-filtrado	51
Tabla 13. Análisis de Varianza (ANOVA) de los sistemas de filtrado	52
Tabla 14. Resultados del análisis fisicoquímico de los sistemas de filtrado	53
Tabla 15: Resultados de la capacidad operativa de cada sistema de filtrado	56
Tabla 16: Resultados de tiempo de regeneración.....	57
Tabla 17: Duración del ciclo	57
Tabla 18: Producción de agua	58
Tabla 19: Resultados de la capacidad de la resina a diferentes concentraciones de regenerante.....	59
Tabla 20: Análisis de Varianza (ANOVA) de concentración de regenerante	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la empresa.....	2
Figura 2: Sistema de evaporación súbita para purificación de agua.....	13
Figura 3: Proceso de ósmosis inversa	14
Figura 4: Ablandamiento en dos etapas recarbonatacion	18
Figura 5: Intercambio de iones en una resina de ablandamiento.....	19
Figura 6: Resina de intercambio iónico	20
Figura 7: Regeneración de resina en ciclo de sodio con solución concentrada de salmuera	22
Figura 8: Sistema de filtrado serie.....	33
Figura 9: Sistema de filtrado al vacío	36
Figura 10: Sistema de filtrado en paralelo.....	38
Figura 11: a) Sistema de filtrado en serie b) Sistema de filtrado en paralelo c) Sistema de filtrado final.....	41
Figura 12: Ciclo de intercambio iónico	42
Figura 13: Filtro de intercambio iónico	42
Figura 14: Montaje experimental para la determinación de la capacidad operativa de la resina.....	45

INTRODUCCIÓN

Dentro de las impurezas más comunes presentes en un agua natural están los iones o sales disueltas, las cuales son necesarias en determinadas concentraciones para el agua de consumo. El agua descrita como dura significa que es alta en minerales disueltos, específicamente calcio y magnesio. Existe discrepancia de opinión de que el agua dura sea o no un riesgo para la salud, pero si es una molestia a causa de su tendencia a acumular minerales en las tuberías domiciliarias y bajo rendimiento en la detergencia en comparación con agua blanda [1].

Los ablandadores tradicionales trabajan por intercambio de iones de ciclo sódico, intercambiando los iones de calcio y magnesio por los iones de sodio, esta operación es básicamente una reacción reversible de sustitución en donde un ion positivo desplaza a otro ion con la misma carga. Al proceso de retornar la resina a su estado original se le denomina regeneración. Con cada regeneración, se pierde cierta capacidad de intercambio, perdiendo varios sitios activos. Esta capacidad de intercambio se puede perder por condiciones rigurosas de pH y temperatura y/o por acción de oxidantes severos [2].

Las resinas son selectivas, es decir, dependiendo del grupo activo, ellas son más afines a unos iones que a otros, por ello, es que es frecuente encontrar sistemas de filtrados que usan resinas de intercambio iónico que no producen la calidad o cantidad del agua requerida, tanto como su mala regeneración o como su concentración de regenerante [3].

Cosmogreen S.A.S es una empresa Cucuteña, ubicada geográficamente en el Patio de la manzana M, de la Zona Franca, con Coordenadas 7°55'15.9"N 72°29'48.2"W, como se muestra en la figura 1. Cosmogreen, es productora de artículos de limpieza para el hogar y la industria distribuye sus productos a más de ocho departamentos de Colombia, al ser una industria productora de artículos de limpieza, requiere de agua con especificaciones de calidad para su producción, ya que una dureza alta disminuye la detergencia, siendo un problema a la hora de elaborar sus productos y a su vez de pérdidas económicas. El agua captada por la empresa es de un pozo subterráneo, el agua dura sin tratar, puede producir detergentes que generar turbidez y precipitados indeseados, por tal razón la empresa Cosmogreen, requiere para su proceso agua, con condiciones fisicoquímicas adecuadas

para elaborar sus productos que no se alteren con el tiempo y no genere pérdidas económicas.

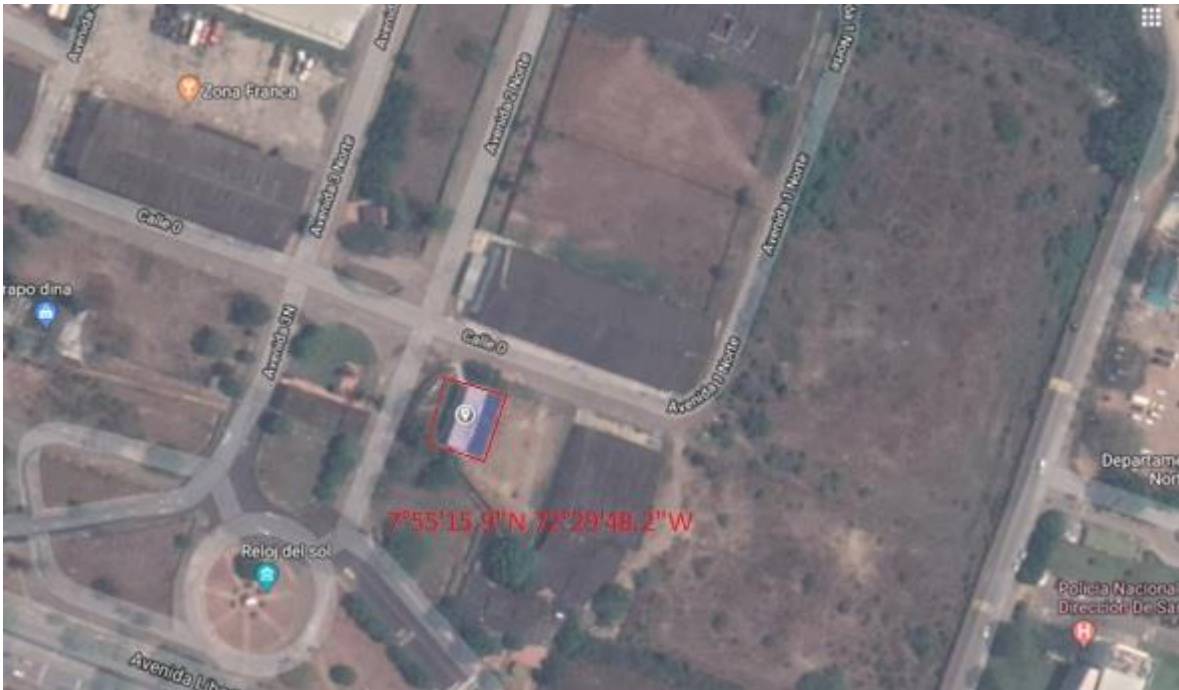


Figura 1: Ubicación de la empresa

Fuente: [4].

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION

La empresa Cosmogreen S.A.S es una empresa colombiana, que brinda soluciones de limpieza integral para el hogar y la industria. Para la producción de los artículos de limpieza la empresa requiere de gran cantidad de agua en las mejores condiciones, es decir libre de dureza, ya que este tipo de agua genera precipitados y turbidez, además de que los surfactantes no iónicos, iónicos y catiónicos son sensibles a los iones calcio, disminuyendo su poder de detergencia, estos surfactantes son los usados para darles propiedades de detergencia a los productos.

Se puede definir a la dureza del agua, como la existencia de cationes metálicos no alcalinos expresado en equivalente de carbonato de calcio, el cual es un parámetro en la calidad del agua [1]. La dureza del agua es debido a la existencia de iones de calcio, magnesio y carbonato, los cuales se encuentran en la capa terrestre de la tierra e influye en la

hidroquímica del agua subterránea [2]. Ésta dureza también es debido a la humedad y a la contaminación por dióxido de carbono, los cuales reaccionan con el ion calcio y magnesio presente en la superficie de la tierra [3]. La mayoría de estas fuentes de agua tienen una dureza que no las hace atractivas para fines industriales y domésticos, a razón de los efectos de la dureza del agua, los cuales se observan en la producción de precipitados que afectan principalmente las calderas de agua para la generación de vapor y agua caliente, así como en la producción de espuma cuando se lava con jabones y en la reducción de la detergencia en la preparación de la mayoría de los detergentes [1].

La procedencia del agua en la empresa, es de origen subterráneo mediante un pozo localizado en la zona franca de la ciudad de Cúcuta-Norte de Santander, por lo tanto, la empresa ha presentado inconvenientes con el agua ya que por su procedencia subterránea se evidencian altas concentraciones de calcio y magnesio.

En este contexto, la presente investigación pretende dar respuesta al siguiente interrogante: ¿cómo la aplicación de una metodología mediante el desarrollo de un sistema de filtrado puede mejorar la calidad del agua? Con el fin de mejorar los procesos industriales de la empresa Cosmogreen S.A.S Cúcuta- Norte de Santander. Con el presente trabajo, se desarrolló un sistema de filtración que cumplió con las exigencias de rendimientos, capacidad y selectividad que la empresa exige. Se mejoró el sistema de filtrado para remover los contaminantes químicos de dureza que se encuentran en el agua extraída del pozo, por medio de un sistema de pre-filtrado con adición de cal, y posteriormente el uso de resinas de intercambio iónico, para la remoción de contaminantes.

Para el logro de esta investigación, se realizaron análisis de las condiciones iniciales del agua extraída del pozo, determinando la composición fisicoquímica, posteriormente se evaluaron dos procesos de desorción estudiándoles el rendimiento y la composición fisicoquímica del agua filtrada, donde, finalmente se desarrolló un sistema de filtración que aumento la producción de agua en los rangos de dureza requeridos por la empresa.

OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un Sistema de Filtrado para la remoción de dureza del agua en la empresa Cosmogreen S.A.S Cúcuta- Norte de Santander

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros de capacidad y rendimiento del sistema de filtrado de ablandamiento de agua existente de la empresa.
- Proponer dos sistemas de filtrado, y evaluarles los rendimientos y las capacidades de ablandamiento.
- Determinar la concentración del regenerante y el tiempo óptimo de lavado de los filtros de intercambio iónico que aumenten la producción de agua en la empresa.

ANTECEDENTES

Dentro de los mecanismos para ablandamiento Cortijo y Herrera realizaron la desalcalinización del agua mediante intercambio iónico como una alternativa viable y de bajo costo para reducir la alcalinidad de un agua de proceso la cual contenía sales (bicarbonato, carbonato de calcio y magnesio) para ser utilizadas en el proceso de manufactura, donde se demostró que es viable la utilización de resinas de intercambio iónico de tipo catiónica fuerte regeneradas con ácido para reducir la alcalinidad del agua, obteniendo una agua con las características deseadas no corrosivas y no incrustante [5].

Cabezas Oruna en el 2016 realizó la obtención de agua ultra pura en la industria mediante resinas de intercambio iónico, esta investigación comparo dos tipos de intercambio iónico: ablandamiento y desmineralización, para el ablandamiento utilizo resinas catiónicas fuertes de sodio, para la desmineralización aplicando procesos de intercambio catiónico y aniónico con zeolitas naturales, donde se demostró que el uso de resinas artificieles tienen 10 veces la capacidad de intercambio iónico que la zeolita artificial debido a que las resinas tiene la ventaja de poder ser reactivadas con facilidad [6].

Para la absorción de iones calcio [7] realizaron el proceso de intercambio iónico para calcio y magnesio del agua subterránea con zeolita natural, donde estudio la absorción de estos iones a diferentes temperaturas, donde demostró que la zeolita es adecuada para la reducción de la dureza a 60°C la eliminación de la dureza total fue de 555mg/L a un pH de 6.9 teniendo un rendimiento del 80.2% de iones de calcio y de 84.8% para los iones de magnesio reduciendo la dureza total a un 81%.

Otro método para el ablandamiento de agua fue realizado por [8] quienes utilizaron membranas de nanofiltración de polieterimida de carga positiva y capas de bipolares para el ablandamiento de agua, donde investigo la absorción de iones calcio mediante membrana de ultrafiltración modificada químicamente con polietilenimina ramificada con la intención de obtener una membrana de nanofiltración de un pH inferior a 9, obteniendo un rendimiento de eliminación de cationes calcio de más del 90% además de una buena selectividad para la eliminación de nitratos teniendo una buena resistencia a la suciedad con una relación de recuperación de flujo cuantitativa.

1. MARCO TEORICO

1.1 Características del agua

1.1.1 Agua:

Según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española el agua se define como *“Líquido transparente, incoloro, inodoro e insípido en estado puro, cuyas moléculas están formadas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, y que constituye el componente más abundante de la superficie terrestre y el mayoritario de todos los organismos vivos”* [9]

Donde existen diferentes tipos de agua, de acuerdo a su procedencia y uso.

- Agua cruda: Es aquella que no ha sido sometida a proceso de tratamiento.
- Aguas negras: Agua de abastecimiento de una comunidad después de haber sido contaminada por diversos usos. Puede ser una combinación de residuos, líquidos o en suspensión, de tipo doméstico, municipal e industrial, junto con las aguas subterráneas, superficiales y de lluvia que puedan estar presentes.
- Aguas grises: Aguas domesticas residuales compuestas por agua de lavar procedente de la cocina, cuarto de baño, aguas de los fregaderos, y lavaderos.
- Agua dura: Es una característica química del agua que está determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, nitratos de calcio y magnesio.

La contaminación del agua es la presencia de componentes o factores químicos, físicos o biológicos que producen una condición de deterioro de una determinada masa de agua. El nivel de contaminación necesario para deteriorar una fuente de agua depende en gran medida del tipo de agua y su ubicación [10].

La contaminación del agua por contaminantes químicos es uno de los mayores problemas ambientales que causa serios problemas a los seres vivos. Los Metales pesados son unos de los contaminantes más importantes en el agua y en especial en las aguas residuales, y se ha convertido en un problema de salud pública debido a su naturaleza no biodegradable y persistente [11]. Se sabe que la mayoría de los metales pesados son agentes carcinógenos y pueden representar una amenaza grave para la población viva debido a su naturaleza no degradable, persistente y acumulativa [12], en la tabla 1, se puede observar las características químicas que tienen efectos nocivos en la salud humana. Sin embargo, algunos metales son esenciales para la vida y juegan un papel irremplazable en el sistema

metabólico humano, como el funcionamiento de sitios de enzimas críticas, pero pueden dañar al organismo en un nivel excesivo.

Tabla 1: Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos Totales	THMs	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos(HAP)	HAP	0,01

Fuente:[13].

Algunos otros metales son xenobióticos, es decir, no tienen un papel útil en la fisiología humana (y en la mayoría de los otros organismos vivos) y pueden causar trastornos incluso a niveles mínimos de exposición muestra las características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana como se ve en la tabla 2 Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.

Tabla 2: Característica químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.

Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones de tipo económico	Expresadas como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	CaCO ₃	200
Cloruros	Cl ⁻	250
Aluminio	Al	0.2
Dureza Total	CaCO ₃	300
Hierro Total	Fe	0.3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0.1
Molibdeno	Mo	0.07
Sulfatos	SO ₄	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO ₄	0.5

Fuente: [13].

1.1.1 Turbidez

La turbiedad del agua es causada por materia suspendida y coloidal tal como arcilla, sedimentos, materia orgánica e inorgánica dividida finamente, plancton y otros microorganismos microscópicos [14], la turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que causa la luz al ser dispersada y absorbida en vez de transmitida sin cambios en la dirección del nivel de flujo a través de la muestra, la correlación de la turbiedad con el peso o concentración del número de partículas de material suspendido es difícil debido a que el tamaño, forma e índice de refracción de las partículas afecta las propiedades de dispersión

de la luz de la suspensión. La determinación de turbiedad es de gran importancia en aguas para consumo humano y en gran número de industrias procesadoras de alimentos y bebidas [15].

Los valores de turbiedad sirven para establecer el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de procesos de coagulación, sedimentación y filtración, como para determinar la potabilidad del agua [16].

1.1.2 Sólidos suspendidos totales

Las aguas crudas naturales contienen tres tipos de sólidos no sedimentables: Coloidales, disueltos, suspendidos. Los sólidos suspendidos son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua, los sólidos menores a 0.01mm, los cuales se consideran sólidos no sedimentables, y los mayores a 0.01mm considerados sedimentables [17].

Los sólidos coloidales consisten en limo fino, bacterias, partículas causantes de color, virus, etc, los cuales no sedimentan sino después de periodos razonables, y su efecto global se traduce en el color y la turbiedad de aguas sedimentadas sin coagulación. Los sólidos disueltos, materia orgánica e inorgánica, son invisibles por separado, no son sedimentables y globalmente causan diferentes problemas de olor, sabor, olor y salud, a menos que sea precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos [18].

1.1.3 Color y materia orgánica

El color en el agua puede tener origen orgánico o inorgánico. Puede ser ocasionado por la presencia de iones metálicos (hierro, manganeso), humus, lodo, arcillas, residuos industriales. Tal coloración debe ser eliminada del agua para usos generales o industriales [19].

- **Color aparente:** es el color causado por la materia suspendida y disuelta, se determina en la muestra original, sin filtrado ni centrifugado.
- **Color real:** El color del agua, cuya turbidez ha sido eliminada, mediante centrifugación o filtración.

Las llamadas materias orgánicas solubles en el agua, es una mezcla compleja de sustancias, algunas de las cuales presumiblemente tienen un color alto y otras tienen color bajo o prácticamente incoloras. En general la remoción o reducción de color y materia orgánica se lleva a efecto por coagulación, floculación, sedimentación y filtración [20].

1.2 Sustancias químicas disueltas

El agua que proviene de los distintos fenómenos meteorológicos, debido a su propio ciclo, va adquiriendo en su composición multitud de sustancias que la contaminan y determinan sus principales características fisicoquímicas. Algunas de estas sustancias pueden resultar beneficiosas e incluso imprescindibles para que animales y plantas puedan realizar muchas de sus funciones biológicas [21].

- **Compuestos químicos orgánicos:** Son aquellas sustancias que contienen carbono y han sido fabricadas por el hombre, como el petróleo, gasolina, plaguicidas, aceites.
- **Compuestos químicos inorgánicos:** se trata de ácidos, sales o metales, cuya presencia en el agua en grandes cantidades pueden causar graves daños en los ecosistemas acuáticos, reduciendo la biodiversidad. Provenientes de vertidos domésticos, agrícolas e industriales.
- **Minerales disueltos:** Todas las aguas naturales, ya sea como agua cruda o después de tratamiento, contienen material mineral disuelta. Los más abundantes son los bicarbonatos, sulfatos y cloruros, presentes como calcio, magnesio y sodio, en forma de mezclas con sus respectivos aniones y cationes. Cuyas solubilidades se dan en términos de su equivalente.

1.2.1 Alcalinidad

La alcalinidad del agua es su capacidad de neutralizar ácidos, y es la suma de todas las bases; el valor medido puede variar significativamente con el pH de punto final empleado. La alcalinidad es una medida de una propiedad agregada del agua y se puede interpretar en términos de sustancias específicas solo cuando se conoce la composición química de la muestra [22].

Debido a que la alcalinidad de muchas aguas superficiales es primariamente una función del contenido de carbonato, bicarbonato e hidróxido, se toma como un indicador de la concentración de estos constituyentes. Los valores medidos también pueden incluir

contribuciones de boratos, fosfatos, silicatos, u otras bases que estén presentes. La alcalinidad superior a las concentraciones de metales alcalinotérreos es significativa para determinar la aptitud de un agua para irrigación [23].

Las mediciones de alcalinidad se emplean en la interpretación y control de los procesos de tratamiento de aguas. Las aguas residuales domésticas tienen una alcalinidad menor, o ligeramente mayor, que la del agua de suministro. Los iones hidroxilo presentes en una muestra como resultado de disociación o hidrólisis de solutos reaccionan con adiciones de ácido estándar. En consecuencia, la alcalinidad depende del pH de punto final empleado [22].

1.2.2 Dureza del agua

La dureza del agua se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes (iones de calcio, estroncio, bario y magnesio) y se expresa en equivalentes de carbonato de calcio y constituye un parámetro muy significativo en la calidad del agua [1], y se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3: Principales cationes que causan la dureza en el agua y los principales asociados con ellos.

Cationes	Aniones
Ca ⁺⁺	HCO ₃
Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁻
Sr ⁺⁺	Cl ⁻
Fe ⁺⁺	NO ₃ ⁻
Mn ⁺⁺	SiO ₃ ⁻

Fuente: [24].

En la dureza del agua existen diferentes tipos dependiendo del tipo del metal, sal o carbonato disuelto en el agua donde los tipos son:

- **Dureza total:** Se refiere a la concentración de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua.
- **Dureza carbonatada o temporal:** Es la que se refiere específicamente a la producida por los hidrogeno carbonatos y carbonatos de calcio y magnesio.

- **Dureza no carbonatada o permanente:** es la producida por las sales de cloruro, sulfato y nitrito de calcio y magnesio.

De acuerdo a la concentración de carbonatos contenidos en el agua, esta puede clasificarse en niveles de dureza, la siguiente tabla indica las cantidades de sales.

Tabla 4: Índices de dureza del agua.

Denominación	mg CaCO ₃ /L
Muy suaves	0-15
Suaves	16-75
Medias	76-150
Duras	150-300
Muy duras	Mayor a 300

Fuente [25].

1.3 Tratamiento de la dureza del agua

Dependiendo de las características del agua extraída de las fuentes de abastecimiento y del uso que se le dará, se debe aplicar el tratamiento adecuado para garantizar la remoción de las sales que pudieran resultar perjudiciales para una aplicación específica.

Existen varias posibilidades para el ablandamiento del agua, que van desde una desmineralización total que se logra mediante la aplicación de algunas resinas utilizadas en el intercambio iónico, hasta el ablandamiento o desmineralización parcial, que consiste en remover sólo una parte de los iones causantes de la dureza en procesos como cal-carbonato, filtración por membranas, efecto del campo magnético [21].

El agua blanda facilita las labores de limpieza, requiere menos detergentes o jabones y resuelve el problema de las incrustaciones, constituyendo así un ahorro de tiempo y dinero. Por el contrario, esta agua es muy corrosiva y no posee los minerales necesarios como, por ejemplo, para el crecimiento de las plantas [1].

1.4 Procesos físicos para la dureza del agua

Los métodos de tratamiento donde predomina la acción de fuerzas físicas se conocen como operaciones físicas. Los principales procesos de transferencia utilizados en el tratamiento dureza del agua son los siguientes:

1.4.1 Evaporación- condensación

Este método constituye un proceso de intercambio térmico, por medio del cual el agua dura se somete a calentamiento hasta llegar a su punto de ebullición, recolectando posteriormente el vapor en un condensador para obtener agua pura. A medida que se evapora el agua la solución se vuelve más concentrada, se llega a un punto en que se rebasa la solubilidad de la sal, esto provoca la precipitación por lo común en forma de incrustaciones sobre las superficies de transferencia de calor donde el agua es evaporada, las incrustaciones pueden consistir en sales de calcio, magnesio y sílice. Estas incrustaciones disminuyen en gran cantidad la velocidad de transferencia de calor, retardando la evaporación y como tal reduciendo la eficiencia térmica [26].

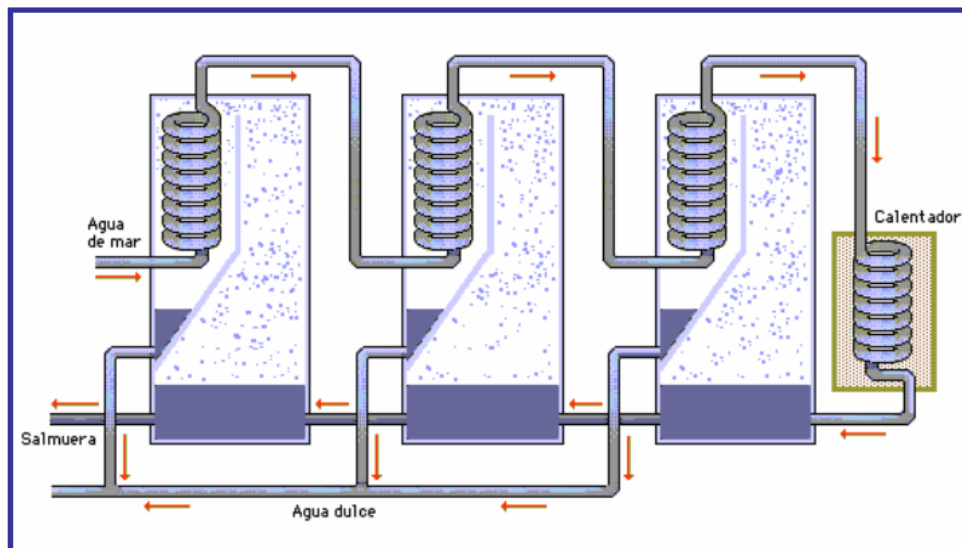


Figura 2: Sistema de evaporación súbita para purificación de agua

Fuente:[27].

1.4.2 Ósmosis inversa

La osmosis es un proceso físico-químico, se relaciona con el movimiento de un solvente a través de una membrana semipermeable donde ocurre una transferencia de masa por medio de difusión simple.

La osmosis inversa es una operación de membrana en la que, por medio de una presión, el solvente de una solución se transfiere a través de una densa membrana fabricada

expresamente para retener sales y solutos de bajo peso molecular. Si una solución salina concentrada está separada del agua pura por este tipo de membrana, la diferencia de potencial químico tiende a promover la difusión del agua desde el compartimiento diluido al compartimiento concentrado para igualar las concentraciones. En el equilibrio, la diferencia de niveles entre los dos compartimientos corresponde a la presión osmótica de la solución salina. Para producir agua pura de una solución salina, debe aplicarse una presión en el área donde se encuentra la mayor concentración de soluto. El agua pasa al otro lado de la membrana semipermeable que retiene los iones, material orgánico e inorgánico disuelto [28].

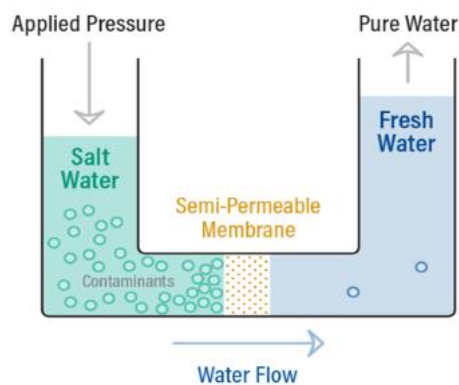


Figura 3: Proceso de ósmosis inversa

Fuente:[29].

1.4.3 Nanofiltración

La nanofiltración, también conocida como ósmosis inversa a baja presión o endurecimiento por membrana, en términos de la selectividad de la membrana se encuentra entre las membranas de osmosis inversa y la ultrafiltración y posee un tamaño de poros típicamente entre 0.001 y 0.01 μm . Estas membranas permiten débilmente el paso de iones monovalentes como el sodio y el potasio, pero rechazan una proporción alta de iones divalentes como el calcio y el magnesio y de moléculas orgánicas de peso molecular mayor a 200. La presión de trabajo usada en la nanofiltración es mucho menor que en la osmosis inversa. Las membranas de la nanofiltración ofrecen una alternativa de tratamiento singular, ya que eliminan contaminantes específicos de aguas con bajos sólidos disueltos totales, este método normalmente elimina en un alto porcentaje la dureza total [30].

1.5 Procesos químicos para el ablandamiento de agua

Consiste en la adición de sustancias al agua que reaccionan con los iones calcio y magnesio, transformándolos en compuestos insolubles, que son separados del agua por los procedimientos físicos como son la decantación y filtración.

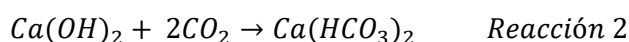
Existen 3 procedimientos para realizar el ablandamiento de agua:

- Ablandamiento con exceso de cal
- Ablandamiento con carbonato de sodio
- Ablandamiento con hidróxido de sodio

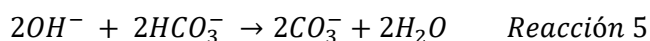
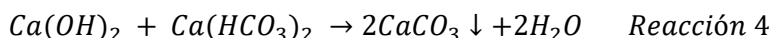
1.5.1 Precipitación con exceso de cal

El ablandamiento con cal es el proceso de precipitación más usado, Consistiendo en la reducción de la dureza del calcio por la adición de cal hidratada al agua para precipitar CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ o ambas. A continuación, se evidencian las reacciones químicas del ablandamiento con exceso de cal [31].

El radical hidroxilo es el componente reactivo de la cal que convierte CO_2 y HCO_3^- en CO_3^{2-} , precipitándose CaCO_3 , como se muestra en la siguiente reacción:



O, en forma iónica:

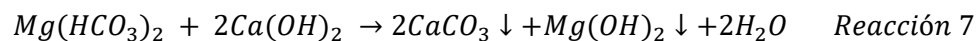
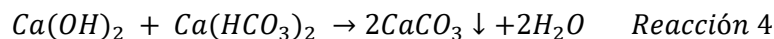
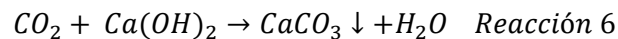


La mayor parte de las reacciones de ablandamiento se llevan a cabo a un pH alrededor de 10 para, Para este valor del pH, el CaCO_3 tiene una carga negativa, y al no ser neutralizadas estas cargas la dureza del coloide puede resistir a la floculación y pasarse al efluente. Sera necesario el empleo de coagulantes catiónicos cuando el grueso del precipitado es CaCO_3 cargado negativamente, con frecuencia se emplea aluminato de sodio como coagulante aniónico cuando se necesitan residuos con poco magnesio. En una etapa sucesiva el pH

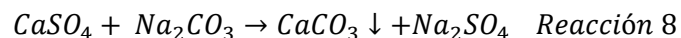
es neutralizado a valores de 8.5 y 9.5 para convertir el carbonato remanente a bicarbonato y estabilizar el agua para evitar la formación de depósitos [32].

1.5.2 Precipitación con carbonato de sodio-cal

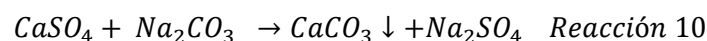
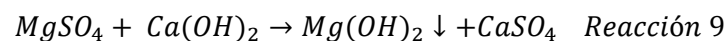
La cal reduce la dureza carbonatada del agua, pero no la dureza no carbonatada. Para remover esta última es necesario agregar carbonato de sodio. Esto se demuestra en las siguientes reacciones que explican los pasos en el ablandamiento con carbonato de sodio-cal, los carbonatos que causan la dureza pueden ser precipitados como carbonatos de calcio o hidróxido de magnesio con la adición de hidróxido de magnesio con la adición de hidróxido de calcio [33].



La dureza por no carbonatos de calcio puede precipitarse con la adición de carbonato de sodio:



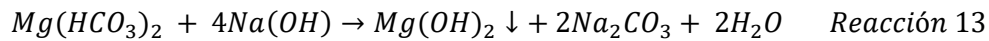
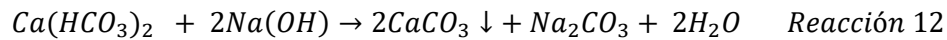
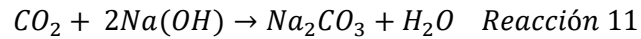
Los no carbonatos de magnesio se precipitan como hidróxido de magnesio con la adición de hidróxido de calcio, Produciendo sulfato de calcio, así mismo este reacciona con carbonato de sodio y se obtiene como precipitado carbonato de calcio [34].



1.5.3 Precipitación con hidróxido de sodio

El proceso de ablandamiento mediante precipitación con hidróxido de sodio utiliza diferentes tipos de reactores de lecho fluidizado de gránulos, sobre la cuales se presenta la cristalización de CaCO₃. Los gránulos se mueven libremente en el flujo ascendente de agua de tal manera que impide su sedimentación; para ello se aplica un caudal mínimo de entrada.

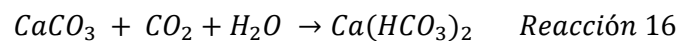
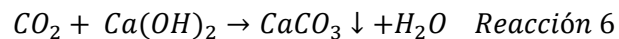
El proceso de ablandamiento con hidróxido de sodio puede considerarse como una variante del proceso de ablandamiento con carbonato de sodio y cal, se produce la precipitación del carbonato de calcio y la formación de carbonato de sodio, que reaccionará con la dureza permanente, de acuerdo con las reacciones formuladas a continuación.



El ablandamiento de agua cruda es regularmente saturado con el carbonato de calcio a valores de pH altos, posteriormente el agua debe estabilizarse antes de someterse a una filtración a la que se adiciona dióxido de carbono o ácido.

1.5.4 Recarbonatación

La recarbonatación se emplea para estabilizar el agua tratada con cal y evitar la formación de precipitado, el dióxido de carbono neutraliza el exceso de cal y precipita en forma de carbonato de calcio, la recarbonatación se puede hacer en dos etapas con objetivos diferentes en cada caso. La primera recarbonatación tiene por objetivo convertir el exceso de cal agregado al agua en carbonato de calcio para permitir así su precipitación y remoción. Asimismo, el hidróxido de magnesio que no se precipita será convertido en carbonato de magnesio. Durante la primera recarbonatación debe controlarse el pH con el fin de no bajarlo de 9.5 e impedir que el CO_3^{2-} sea convertido en HCO_3^- con lo cual el exceso de Ca^{++} no se precipitará como $CaCO_3$ [35], las reacciones que se evidencian en este proceso se muestran a continuación.



La segunda recarbonatación tiene como fin eliminar la tendencia del agua, ablandada con hidróxido de sodio o carbonato de sodio, el cual por su pH alto continuará depositando carbonato de calcio, presentando un problema en la eficiencia de filtración sedimentando el

medio filtrante. Por lo tanto, la adición en este punto del CO_2 convertirá el carbonato de calcio en bicarbonato de calcio haciéndolo soluble y evitando su precipitación en el filtro. El efecto se logra añadiendo CO_2 hasta un pH de 8.6 [36].

Las reacciones que se evidencian en este proceso se muestran a continuación:

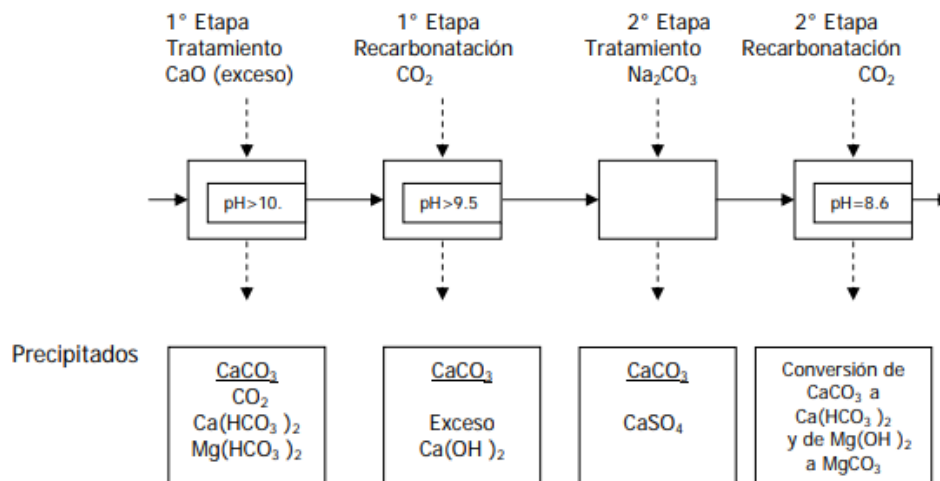
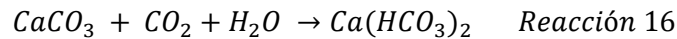
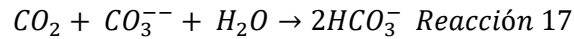


Figura 4: Ablandamiento en dos etapas recarbonatación

Fuente: [26]

1.6 Intercambio Iónico

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluida-sólido. Implica la transferencia de uno o más iones de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales. La eficacia del proceso depende del equipo sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de materia. Los sólidos suelen ser de tipo polimérico, como las resinas sintéticas siendo estas las más usadas habitualmente.

La transferencia de iones es un proceso rápido y reversible en el cual los iones impuros presentes en el agua son reemplazados por iones que despiden una resina de intercambio

de iones. Los iones impuros son tomados por la resina que debe ser regenerada periódicamente para restaurarla a su forma iónica original. Los iones con carga positiva se llaman cationes y son generalmente metales, los iones con cargas negativa se llaman aniones y son generalmente no metales [5].

El intercambio iónico tiene una capacidad limitada para almacenar iones en su estructura, llamada capacidad de intercambio; en virtud de esto, llegara finalmente a saturarse con iones indeseables. Entonces se lava con una solución fuertemente regenerante que contiene iones deseables, los mismos que sustituyen a los iones indeseables acumulados, dejando al material en condiciones útiles de operación. Esta operación es un proceso químico cíclico, y el ciclo completo incluye de ordinario retro lavado, regeneración, enjuagado y servicio [37].

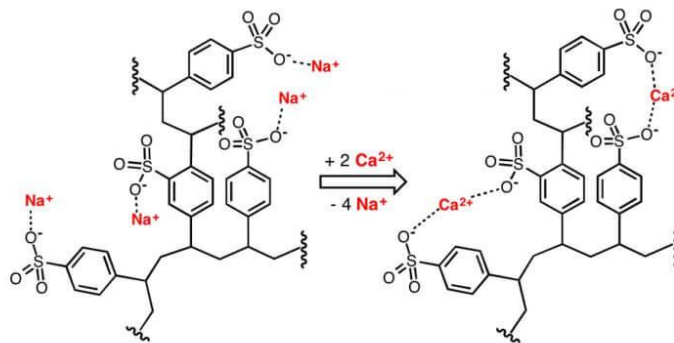


Figura 5: Intercambio de iones en una resina de ablandamiento

Fuente: [38].

Para el ablandamiento del agua por intercambio iónico existen al menos 3 procedimientos utilizados basados en la utilización de determinados tipos de resinas y compuestos regenerantes, y cuya aplicación depende principalmente del nivel al que se quiere reducir la dureza y el contenido de sólidos disueltos totales.

Estos procedimientos son los siguientes:

- Resina catiónica: ciclo de sodio.
- Resina catiónica: ciclo de hidrógeno.
- Desmineralización: ciclo con resinas catiónicas y aniónicas.

1.6.1 Resinas de intercambio iónico

Las Resinas de intercambio iónico son poli electrolitos o macromoléculas insolubles en agua, compuestos por una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, incorporados a una matriz de un polímero sintético. Estas resinas de intercambio iónico reaccionan como ácidos, bases o sales, pero tienen la peculiaridad de tener solo cationes o aniones con la habilidad de tomar parte de la reacción química, por su capacidad de migración [39].

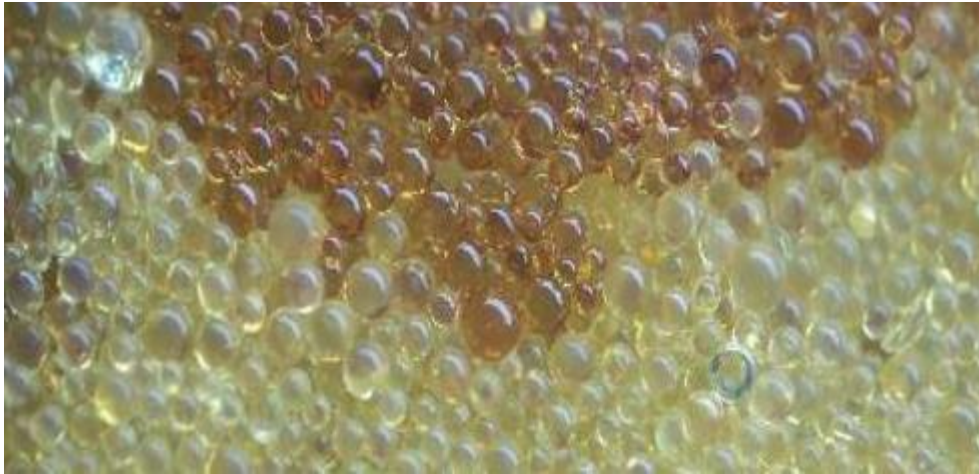
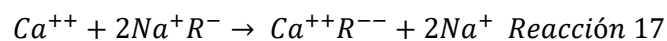


Figura 6: Resina de intercambio iónico

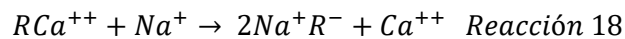
Fuente: [6].

La reacción efectuada en el sitio activo conformado por Na^+ en una matriz R y el ion calcio Ca^{++} presente en la solución que se pone en contacto es la siguiente.

Reacción de resina iónica con iones de calcio:



Reacción de regeneración con la resina iónica:



A medida que la disolución pasa a través de la resina, los iones presentes en dicha disolución desplazan a los que estaban originalmente en los sitios activos. La eficacia del proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH de la disolución, la concentración de iones o la temperatura [39].

Los parámetros característicos de las resinas de intercambio iónico son los siguientes:

- **Capacidad de intercambio:** Se define como la cantidad de iones que una resina puede intercambiar en determinadas condiciones experimentales. Depende del tipo de grupo activo y del grado de entrecruzamiento de la matriz y se expresa en equivalentes por litro de resina o gramo.
- **Capacidad específica teórica:** Se denomina así al número máximo de sitios activos del intercambiador por gramo. Este valor puede ser mayor que la capacidad de intercambio, ya que no todos los sitios activos son accesibles a los iones en disolución.
- **Selectividad:** Propiedad de los intercambiadores iónicos por la que un intercambiador muestra mayor afinidad por un ion que por otro. La selectividad de una resina por un ion determinado se mide en el coeficiente de selectividad

La mayoría de las resinas de intercambio iónico consisten en copolímeros de poliestireno-divinilbenceno reticulados funcionalizados y se clasifican convencionalmente en dos grupos principales resinas de intercambio catiónico e intercambio aniónico [40].

- **Resinas catiónicas de ácido fuerte:** Las resinas catiónicas fuertes acidas derivan su funcionalidad de grupos ácidos sulfónicos, las cuales funcionan a cualquier nivel de pH requiere una cantidad sustancial de regenerante.
- **Resinas catiónicas de ácido débil:** Las resinas catiónicas débiles están sujetas a una menor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo, temperaturas bajas, una proporción entre la dureza y la alcalinidad menores
- **Resinas aniónicas de base fuerte:** Las resinas aniónicas de basicidad fuerte derivan su funcionalidad de los sitios de intercambio de amonio cuaternario, se funcionalizan dependiendo de su proceso de activación química.
- **Resinas aniónicas de base débil:** las resinas aniónicas de base débil contienen el grupo funcional de poliamina que actúa como absorbedor de ácido, eliminando los ácidos fuertes de la corriente del efluente de cationes.

La regeneración tiene dos inconvenientes muy importantes: el gasto económico del regenerante y la generación de residuos, ya que después de regenerar el intercambiador se obtiene disoluciones muy concentradas en metales que deben ser tratadas o eliminadas [37].

1.6.2 Regenerante de resinas de intercambio iónico

La ventaja de las resinas de intercambio iónico es que tienen habilidad para recuperar la capacidad original, mediante el tratamiento con una solución que puede ser ácido, una base o una sal, según la resina y el uso, que desplace los iones retenidos por la resina y los reemplace por iones deseados, este procedimiento se llama regeneración y es el que permite utilizar la resina una y otra vez. Simplemente cuando la resina agota su capacidad de intercambio, se regenera [7].

Para la regeneración se efectúa las siguientes operaciones que están evidenciadas en la ilustración 7:

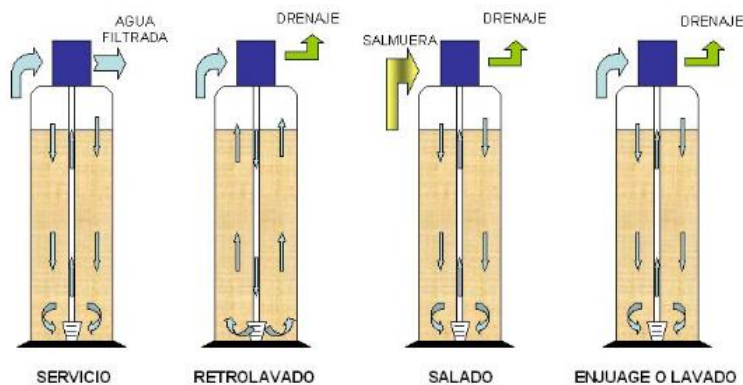


Figura 7: Regeneración de resina en ciclo de sodio con solución concentrada de salmuera

Fuente: [41].

Retrolavado: En el retrolavado se hace circular el agua de alimentación al filtro, de abajo hacia arriba, al contrario de como circula normalmente cuando el filtro está en operación. Esta agua de retrolavado sale por la parte superior del filtro y es desechada. El retrolavado tiene la finalidad de redistribuir el lecho o cama de resina y evitar que esta se compacte, formando canalizaciones en el agua que fluye, y disminuyendo con esto la eficiencia y capacidad del filtro.

Salmuera: Después del retrolavado se hace circular una solución de sal a través del lecho de resina. Para esto se prepara una solución de sal en agua y se hace circular en el filtro, fluyendo esta solución de arriba hacia abajo. La cantidad de sal empleada es de

aproximadamente 5 kg. De sal de grano por cada pie cubico de resina en el filtro. Esta sal se disuelve en la cantidad de agua que sea suficiente para su disolución completa y se vierte en el filtro, o se agrega directamente a este y se disuelve la sal agregando agua al recipiente. Con esto la resina regresa a su condición original y es capaz de remover nuevamente la dureza de un cierto volumen de agua que pase por el filtro. Durante el baño en salmuera el agua que fluye y sale por la parte inferior del filtro es desechada hacia el drenaje.

Lavado: El lavado tiene como finalidad eliminar toda la solución de salmuera, que tiene una alta concentración de dureza, para esto se hace fluir agua de alimentación de arriba hacia abajo, de forma normal de operación del filtro, y el agua de lavado es desechada hacia el drenaje, al término de la operación la resina y el filtro están listos para su operación normal.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1 Tipo de investigación

Teniendo en cuenta la orientación y finalidad del proyecto, el estudio fue tipo descriptiva-explicativa, en tanto se intenta demostrar la situación actual del sistema de tratamiento de dureza de la empresa COSMOGREEN S.A.S, y los análisis realizados para la solución de la problemática. Se optó el tipo de estudio descriptivo porque permite medir las situaciones y eventos, esto es; decir como es determinado fenómeno y como se manifiesta, busca especificar las propiedades importantes del fenómeno que sea sometido a análisis.

Por otro lado, es explicativa en tanto además de describir el fenómeno de estudio, trata de buscar la explicación del comportamiento de las variables, el funcionamiento y bajo qué condiciones se da éste, usando como instrumento una modelización conceptual o teoría.

La presente investigación permite observar los cambios que se produjeron al momento de manipular las variables independientes. Este proyecto se basó en la toma de datos y plantear de manera clara cuales son los problemas que afectan directamente la calidad del agua, y describir las posibles soluciones o instrumentos que ayuden a cumplir con cada uno de los objetivos [42].

2.2 Población y muestra

A fines de cumplir con los objetivos planteados en el proyecto, se seleccionó como población, [43]. accesible el pozo subterráneo que abastecen a la empresa COSMOGREEN S.A.S y la situación actual del sistema de tratamiento de dureza, debido a que a éstos se les realizaran estudios preliminares por medio de muestras representativas que se extraen de ellos, con el objeto de analizar las características y propiedades del agua.

La toma de muestra se realizó según el manual de instrucciones para la toma, preservación transporte de muestras de agua de consumo humano para el análisis [44]. Se tomó una muestra representativa no probabilística de 250 ml para el pozo, con el fin de analizar las características fisicoquímicas y microbiológicas de la fuente de agua. Todas las muestras se realizaron por triplicado según el método manual de análisis físicoquímico del agua.

2.3 Caracterización del recurso hídrico

Para el alcance del primer objetivo se analizaron los resultados obtenidos en la caracterización del agua cruda comparando con los parámetros establecido por la empresa, que expone los valores máximos admisibles de las características físicas, químicas en la calidad del agua para producción.

La caracterización fisicoquímica se realizó en el laboratorio de BIOLOGISTICA S.A.S. una empresa de ingeniería y logística para el medio ambiente especializada en análisis de agua para el consumo humano, en la siguiente tabla se muestran los análisis realizados con su respectivo método detallado en la tabla 5.

Además, de los análisis fisicoquímicos se realizaron los análisis de bombeo y transmisividad del pozo, este diagnóstico permitió definir y detallar el estado físico, estructural y condiciones de operación del pozo subterráneo que abastece a la empresa (ANEXO A).

Tabla 5: *Métodos de análisis de calidad de agua de pozo*

Parámetro	Método
Alcalinidad	Titulación
Aluminio	Absorción atómica
Calcio	Titulométrico EDTA
Color aparente	Espectrofotométrico
Cloro residual	Titulación
Cloruros	Cromatografía iónica
COT	persulfato
Dureza total	Titulometrico EDTA
Fluoruros	Cromatografía iónica
Fosfatos	Cromatografía iónica
Hierro	Absorción atómica
Magnesio	Titulometrico EDTA
Manganeso	Absorción atómica
Nitratos	Cromatografía iónica
Molibdeno	Absorción atómica
pH	Electrométrico

Sulfatos	Cromatografía iónica
Turbiedad	Nefelométrico
Zinc	Absorción atómica

Fuente: [Autor].

2.4 Análisis físico-químico del agua captada

La caracterización fisicoquímica se realizó en el laboratorio de la empresa Cosmogreen y en el laboratorio de control de calidad de la Universidad de Pamplona, Los métodos utilizados para el análisis de agua siguieron las técnicas del manual de métodos fisicoquímicos para el análisis de agua y se describen a continuación. [19].

2.4.1 Análisis de dureza:

La determinación de dureza se calculó por el método volumétrico con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) [24].

2.4.1.1 Preparación de los reactivos

Para la determinación de la dureza se preparó la solución amortiguadora disolviendo 1.179 g de sal disódica de ácido etilendiaminotetraacético dihidrato (reactivo grado analítico) y 644 mg de cloruro magnésico en 50 mL de agua destilada. Esta solución se agregó a 16.9 g de NH₄Cl y 143 mL de NH₄OH concentrado y se diluyó hasta 250 mL con agua destilada.

Para preparar el Titulante EDTA, 0,1 M se pesó 37,23 g de EDTA grado de reactivo analítico y se disolvió en agua destilada hasta aforar a 1000 mL. Todo este procedimiento de acuerdo con el manual de análisis fisicoquímico del agua [24].

2.4.1.2 Procedimiento de análisis de dureza

Para la determinación de dureza las muestras se recogieron en un recipiente de vidrio, debidamente lavado y enjuagados, el volumen mínimo de recolección por muestra fue de 500mL), se tomó 100 mL de la muestra previamente refrigeradas a 25°C y transferidas a un Erlenmeyer, donde se le adiciono 2 mL de la solución amortiguadora y 1 mL del indicador de negro de eriocromo T, se mezcló por agitación durante 2 minutos, se prosiguió a titular mediante una bureta de 50 ml adicionando el EDTA lentamente hasta que el viraje de color rojizo a azul.

2.4.1.3 Cálculos del análisis de dureza

Para determina la dureza se utiliza la siguiente ecuación:

$$[CaCO_3] = \frac{V_{EDTA} * [EDTA]}{V_{muestra}} * PMCaCO_3 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

[CaCO₃]= concentración de carbonato de calcio en ppm (mg/L)

[EDTA]= Molaridad del EDTA utilizado para la titulación

V_{EDTA} = Volumen consumido de EDTA en mL

V_{muestra}= Volumen de la muestra en mL

PMCaCO₃= Peso molecular de CaCO₃ (100091 mg/mol)

2.4.2 Análisis sólidos totales

Los sólidos totales se analizaron por el método de sólidos totales secados a 103°C – 105°C [17].

2.4.2.1 Procedimiento de análisis de sólidos totales

Para la determinación de los sólidos totales se tomó una muestra de 100mL de la muestra transferida a la capsula de porcelana, esta capsula fue llevada a baño maría para precalentado a temperatura de ebullición y luego secada en un horno a 103°C-105°C durante 2 horas, donde luego fue llevada a un desecador para enfriar durante 2 horas para finalmente ser analizada, la muestra se pesó con una balanza analítica marca KERN 770 ± 0,0001 [17].

2.4.2.2 Cálculos del análisis de sólidos totales

Para determinar los sólidos totales en la muestra se utiliza la siguiente ecuación:

$$ST = \frac{(M1 - M2) * 1000}{V} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

ST= sólidos Totales en mg/L

M1= Peso final de la capsula con el residuo seco en gramos

M2= Peso inicial de la capsula tarada en gramos.

V= Volumen de muestra desecada en litros

2.4.3 Análisis de pH

La determinación de potencial de hidrogeno se realizó por el método electrométrico [45].

2.4.3.1 Procedimiento de análisis de pH

La determinación de pH se realizó mediante un equipo multifunción multi level1 de la marca inoLab (ANEXOS B), donde se tomó una muestra de 50 mL en un vaso de precipitado de 100mL, donde se introdujo el electrodo agitándolo para garantizar la homogenización, el valor del pH se toma cuando el valor este estable, este análisis se realizó por triplicado.

2.4.4 Análisis de conductividad

La determinación de la conductividad eléctrica se realizó por el método electrométrico en aguas [46].

2.4.4.1 Procedimiento de análisis de conductividad

La determinación de la conductividad se realizó mediante un equipo multifunción multi level1 de la marca inoLab, donde se tomó una muestra de 50 mL en un vaso de precipitado de 100mL, se introdujo el electrodo agitándolo para garantizar la homogenización, el valor de la conductividad se toma cuando el valor este estable, las unidades de conductividad están en microsiemens por centímetro($\mu\text{s}/\text{cm}$).

2.4.5 Análisis de Turbiedad

La determinación de la turbiedad se realizó por el método de nefelometría [16].

2.4.5.1 Procedimiento de análisis de turbiedad

La determinación de la turbiedad se realizó mediante el equipo 2100N turbidimeter de la marca HACH (ANEXOS C), donde se tomó una muestra de 100 mL en un vaso de precipitado, una parte de la muestra se adicionó hasta la marquilla de la celda de vidrio, se topó y se agitó durante 30 segundo para finalmente ser introducida en el turbidímetro, se

tomó el valor el primer valor mostrado por el equipo, las unidades de turbiedad están en NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

2.4.6 Análisis de la demanda química de oxígeno

La determinación de la demanda química de oxígeno se realizó por el método espectrofotométrico [47].

2.4.6.1 Procedimiento demanda química de oxígeno

Para la determinación de la demanda química de oxígeno, primero las muestras se recogieron en un recipiente de vidrio, debidamente lavado y enjuagados, el volumen mínimo de recolección por muestra es de 500mL), se tomó 2mL de la muestra previamente refrigeradas a 25°C y transferidas a un tubo de digestión de borosilicato, donde se le adiciono 1.5 mL de la solución digestora y 3.5 mL de la solución catalizadora, estos reactivos fueron suministrados por la universidad ya previamente preparadas para su uso. El tubo de digestión con la muestra se dejó en un termoreactor para DQO de la marca HACH (ANEXOS D) durante 2 horas, finalmente la muestra es fue analizada en un espectrofotómetro DR 3800 de la marca HACH (ANEXO E) con una longitud de onda de 620nm, las unidades del resultado son en mgO₂/L [47].

2.4.7 Análisis de la demanda biológica de oxígeno

La determinación de la demanda biología de oxígeno se realizó por el método de incubación por 5 días [48].

2.4.7.1 Procedimiento del análisis de la demanda biológica de oxígeno

Para la determinación de la demanda biológica de oxígeno, primero las muestras se recogieron en un recipiente de vidrio, debidamente lavado y enjuagados, el volumen mínimo de recolección por muestra es de 500mL), se tomó 432 mL de la muestra previamente refrigeradas a 25°C esto según las especificación del equipo, para ser transferida a una botella para DBO (ANEXO F), a la botella se le introdujo en el soporte de goma una hojuela de hidróxido de sodio, y fueron selladas con la tapa de registro, las botellas se introdujeron en el equipo marca OxiTop Box (ANEXO G) y fueron dejadas durante 5 días, los resultados se muestran por día en mgO₂/L.

2.5 Análisis de la demanda de agua para producción

El agua para producción se usa en mayor parte para la elaboración de cloro denso y limpiador de citronela, los cuales actualmente son vendidos en 8 departamentos del país, además la empresa cuenta con la demanda de productos industriales en la región vendiendo aproximadamente a 20 empresas de la ciudad de Cúcuta productos de limpieza industriales. Para analizar la demanda de agua de producción se tuvo en cuenta la cantidad de producto vendidos semanalmente por la empresa. La demanda de productos se evidencia en la tabla 6.

Tabla 6 Producción actual y futura de la empresa Cosmogreen S.A.S

Producto	Producción actual		Producción a futuro	
	Cantidad en cajas	Cantidad por litros	cantidad en cajas	cantidad en litros
Cloro denso	500	6000	1000	12000
Limpiador citronela	100	1200	500	6000
Producción industrial	N/A	2000	N/A	6000

Fuente: [Autor]

2.6 Sistema de filtrado actual

La empresa actualmente cuenta con un sistema de filtrado para la producción y con el fin de cumplir los objetivos de mejorar el sistema de filtrado se realizaron los análisis fisicoquímicos para la siguientes tanques y corrientes del proceso. El sistema de filtrado se muestra en la ilustración 8.

- i. Taque Tk-101 de almacenamiento de agua de la zona franca
- ii. Salida del primer filtro F-102 de resina de intercambio iónico.
- iii. Salida del segundo filtro F-103 de resina de intercambio iónico.
- iv. Tanque Tk-102 de almacenamiento de agua de proceso
- v. Salida del tercer filtro F-201 de resina de intercambio iónico a producción.

2.6.1 Análisis físico-químico del sistema de filtrado actual

Con el objetivo de mejorar el sistema de filtrado se realizó los análisis fisicoquímicos, los análisis se realizaron en el laboratorio de la empresa Cosmogreen y en la universidad de

pamplona. Los métodos utilizados para el análisis de agua se realizaron según el manual de métodos fisicoquímicos para el análisis de agua [19].

- a) **Análisis de dureza:** La determinación de dureza se calculó por el método volumétrico con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), este análisis se realizó por triplicado.
- b) **Análisis sólidos totales:** Para la determinación de los sólidos totales se calculó por el método de sólidos totales secados a 103°C – 105°C. este análisis se realizó por triplicado.
- c) **Análisis de pH:** La determinación de potencial de hidrogeno se realizó por el método electrométrico por medio de un pH-metro de electrodo, este análisis se realizó por triplicado.
- d) **Análisis de conductividad:** La determinación de la conductividad eléctrica se realizó por el método electrométrico por medio de un electrodo, este análisis se realizó por triplicado.
- e) **Análisis de turbiedad:** La determinación de la turbiedad se realizará con la ayuda de un turbidímetro, donde la toma de la muestra se prepara previamente en un lugar oscuro a temperatura ambiente, y procedida analizar mediante el método de nefelometría. Este análisis se realizó por triplicado.
- f) **Análisis demanda química de oxígeno:** La determinación de la demanda química de oxígeno se realizó por el método espectrofotométrico. Este análisis se realizó por triplicado.
- g) **Análisis demanda biológica de oxígeno:** La determinación de la demanda biológica de oxígeno se realizó por el método de incubación por 5 días.

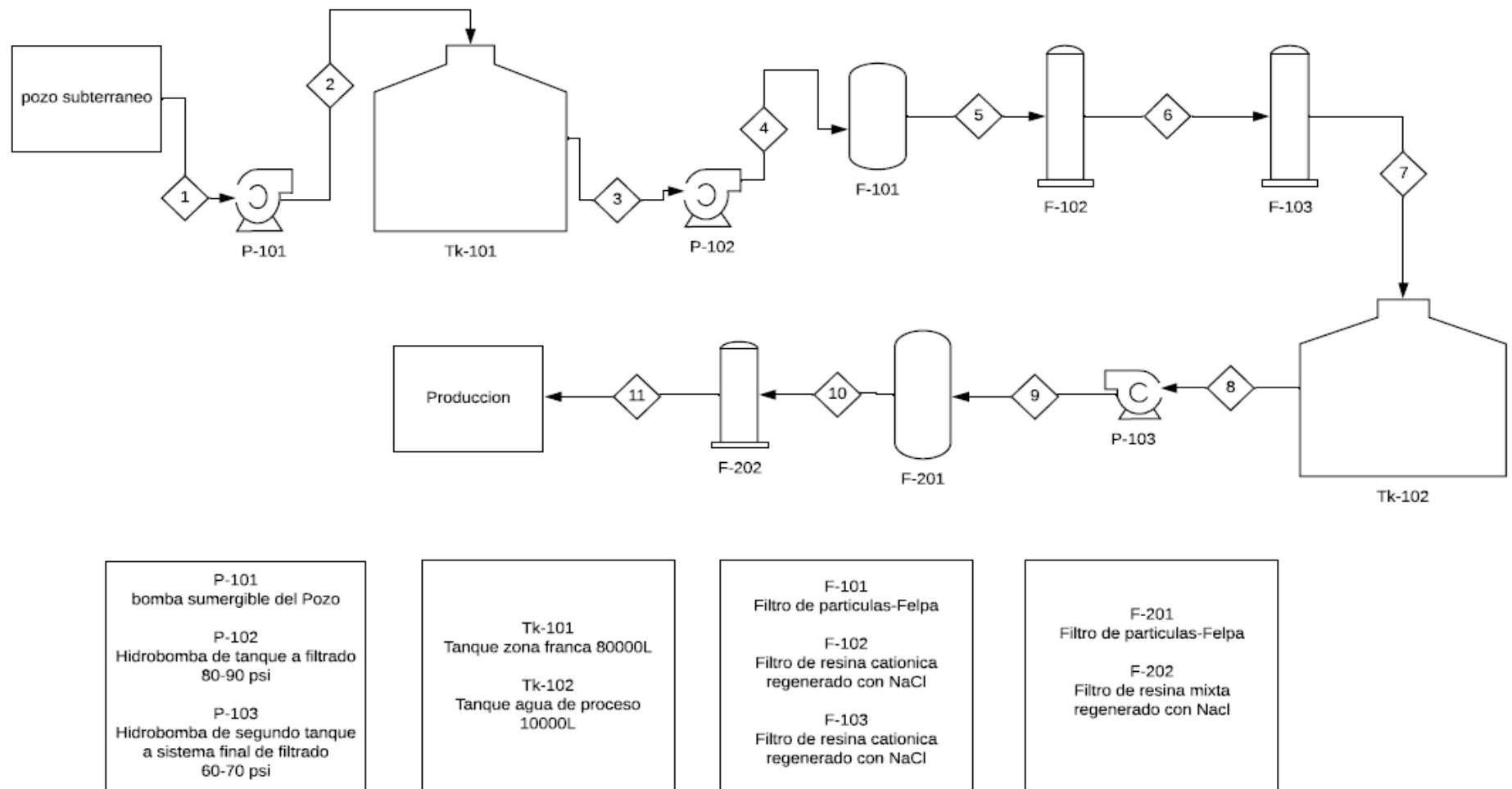


Figura 8: Sistema de filtrado serie.

Fuente: [autor]

2.7 Selección de tecnología de tratamiento

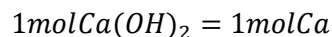
A partir de la revisión de literatura y según los datos observados a partir de la caracterización del recurso hídrico, se seleccionaron las tecnologías de tratamiento pertinentes para la reducción de la dureza, y teniendo en cuenta la naturaleza experimental-analítica del proyecto se definieron las variables que impactan la operación de la filtración, donde se establecieron la relación entre ellas con el fin de seleccionar las tecnologías para el sistema de filtrado.

A continuación, se muestran las variables que se tuvieron en cuenta en la ejecución del proyecto:

- i. Tratamiento pre-filtrado
- ii. Tiempo de filtrado
- iii. Producción de agua
- iv. Capacidad del filtrado de intercambio iónico
- v. Tiempo de regeneración
- vi. Concentración de regenerante (salmuera)

2.8 Pre-filtrado del agua por precipitación con cal

Con el propósito de observar el comportamiento de esta tecnología se realizó a escala laboratorio la precipitación con cal mediante pruebas de jarras añadiendo diferentes concentraciones de hidróxido de calcio. Para calcular la cantidad de hidróxido de calcio se consideró que el calcio a eliminar se encontraba todo en forma de bicarbonato, el cual se muestra en la reacción 4, la eliminación de un mol de calcio, en forma de bicarbonato, requiere un aporte de un mol de hidróxido de calcio [34].



$$\frac{g\text{Ca(OH)}_2}{PM\text{Ca(OH)}_2} = \frac{g\text{Ca}}{PM\text{Ca}}$$

$$g\text{Ca(OH)}_2 = \frac{g\text{Ca} * 74}{40} = 1.85 * g\text{Ca} \quad \text{Ecuación 3}$$

La eliminación de un mol de magnesio en forma de bicarbonatos, requiere dos moles de hidróxido de calcio, ya que se necesita un mol para su transformación en carbonato de magnesio y otro mol para convertir este en hidróxido de magnesio, de acuerdo con la reacción 7. Por lo tanto, la eliminación de una determinada concentración del exceso de magnesio de agua, se produce mediante la siguiente ecuación [34].

$$1\text{molCa(OH)}_2 = 2\text{molMg}$$

$$\frac{CCa(OH)_2}{PMCa(OH)_2} = \frac{2 * gMg}{PMMg}$$

$$gCa(OH)_2 = \frac{gCa * 2 * 74}{23.4} = 6.1 * gMg \quad \text{Ecuación 4}$$

A partir de ahora, se puede simplificar los cálculos considerando que todo el calcio y magnesio del agua se encuentran en forma de bicarbonatos, y sin tener en cuenta que el dióxido de carbono y la dureza permanente consuman parte de la cal, se obtiene un valor aproximado para realizar la prueba de jarras mediante la siguiente expresión.

$$gCa(OH)_2 = 1.85gCa + 6.1gMg \quad \text{Ecuación 5}$$

2.8.1 Pruebas de jarras para precipitación con cal

Con el objetivo de medir la cantidad de dureza removida mediante la precipitación con cal, se realizó 4 tratamiento de precipitación mediante prueba de jarras por triplicado, la prueba de jarras consistió en adicionar cierta cantidad de hidróxido previamente calculado y pesado en una balanza analítica marca KERN 770 ± 0,0001, y adicionados en 1 litro de a gua cruda a las mismas condiciones, donde primero fue mezclado rápido por el equipo a 120Rpm durante 15 minutos, seguido de mezclado lento 40 Rpm durante 15 minutos para finalmente dejarlo reposar durante 30 minutos para así formar el precipitado, las condiciones de operación de la prueba de jarra se muestran en la tabla 7.

Tabla 7: Condiciones de la prueba de jarra

Prueba de jarra						
Peso Cal<g>	Rpm	Tiempo<min>	Rpm	Tiempo<min>	reposo<min>	volumen <mL>
0.937	120	15	40	15	30	1000
1.137						
1.337						
1.537						

Fuente: [autor].

Para calcular la cantidad de precipitado, se procedió primero a pesar el papel filtro en la balanza analítica, para luego ser utilizado en el filtrado al vacío, el sistema de filtrado se ve evidenciado en la ilustración 9, el filtrado se secó en un horno durante 30 minutos a una temperatura de 45°C, y enfriado en un desecador de gel de sílice durante 20 min, para finalmente ser pesado en la balanza analítica, con este resultado se calculó la cantidad de precipitado mediante la ecuación 6.

$$\text{Peso del precipitado} = \text{peso del filtrado seco} - \text{peso del papel filtro} \quad \text{Ecuación 6}$$

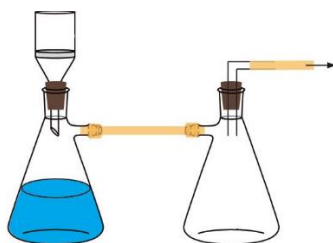


Figura 9: Sistema de filtrado al vacío

Fuente: [autor]

Todo el procedimiento se ve evidenciado en el ANEXO H).

2.8.2 Análisis de calidad de agua del Pre-filtrado

Con el fin de analizar el sistema de precipitación con cal, se tomó una muestra representativa de cada filtrado para así realizar la caracterización fisicoquímica, La caracterización fisicoquímica se realizó en el laboratorio de la Universidad de Pamplona,

Los métodos utilizados para el análisis de agua se realizaron según el manual de métodos fisicoquímicos para el análisis de agua [19].

- a) **Análisis de dureza:** La determinación de dureza se calculó por el método volumétrico con (EDTA), este análisis se realizó por triplicado.
- b) **Análisis sólidos totales:** Para la determinación de los sólidos totales se calculó por el método de sólidos totales secados a 103°C – 105°C. este análisis se realizó por triplicado.
- c) **Análisis de pH:** La determinación de potencial de hidrogeno se realizó por el método electrométrico por medio de un pH-metro de electrodo, este análisis se realizó por triplicado.
- d) **Análisis de conductividad:** La determinación de la conductividad eléctrica se realizó por el método electrométrico por medio de un electrodo, este análisis se realizó por triplicado.
- e) **Análisis de turbiedad:** La determinación de la turbiedad se realizará con la ayuda de un turbidímetro, donde la toma de la muestra se prepara previamente en un lugar oscuro a temperatura ambiente, y procedida analizar mediante el método de nefelometría. Este análisis se realizó por triplicado.

2.9 Filtrado de intercambio iónico

Con el objetivo de mejorar el sistema de filtrado de intercambio iónico existente, se propuso el cambio de los filtros F-102 y F-103 a paralelo como se muestra en la figura 10, con el fin de aumentar la producción y disminuir la duración del ciclo de filtrado.

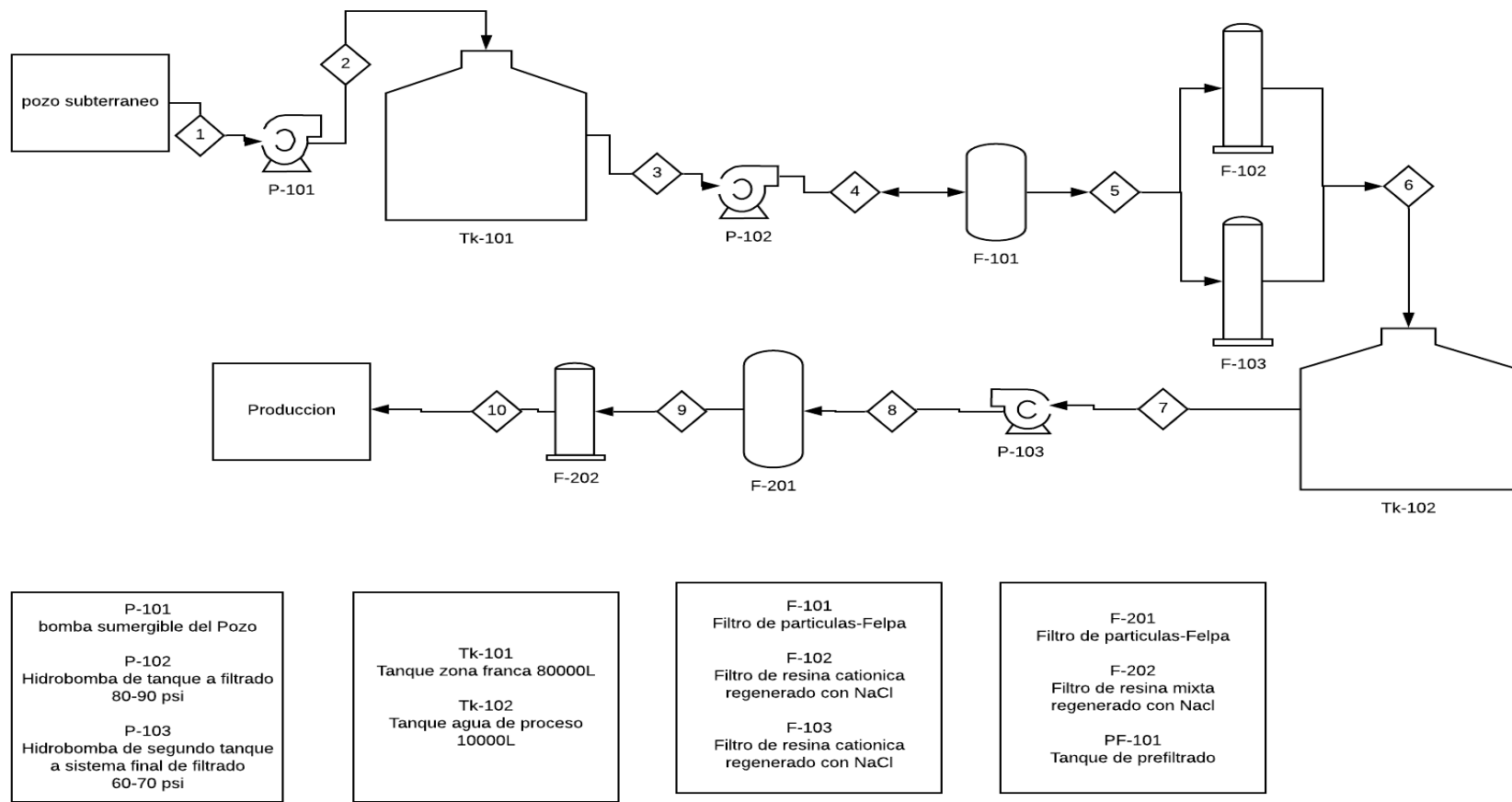


Figura 10: Sistema de filtrado en paralelo

Fuente: [autor].

2.9.1 Análisis físico-químico del Sistema de filtrado paralelo

Con el fin de analizar el sistema de filtrado propuesto, se tomó una muestra representativa de los tanques y corrientes del proceso de cada filtrado para así realizar la caracterización fisicoquímica, esta caracterización se realizó en el laboratorio de la Universidad de Pamplona. Los métodos utilizados para el análisis de agua se realizaron según el manual de métodos fisicoquímicos para el análisis de agua [19].

- a) **Análisis de dureza:** La determinación de dureza se calculó por el método volumétrico con EDTA, este análisis se realizó por triplicado.
- b) **Análisis sólidos totales:** Para la determinación de los sólidos totales se calculó por el método de sólidos totales secados a 103°C – 105°C. este análisis se realizó por triplicado.
- c) **Análisis de pH:** La determinación de potencial de hidrogeno se realizó por el método electrométrico por medio de un pH-metro de electrodo, este análisis se realizó por triplicado.
- d) **Análisis de conductividad:** La determinación de la conductividad eléctrica se realizó por el método electrométrico por medio de un electrodo, este análisis se realizó por triplicado.
- e) **Análisis de turbiedad:** La determinación de la turbiedad se realizará con la ayuda de un turbidímetro, donde la toma de la muestra se prepara previamente en un lugar oscuro a temperatura ambiente, y procedida analizar mediante el método de nefelometría. Este análisis se realizó por triplicado.
- f) **Análisis demanda química de oxígeno:** La determinación de la demanda química de oxígeno se realizó por el método espectrofotométrico. Este análisis se realizó por triplicado.
- g) **Análisis demanda biológica de oxígeno:** La determinación de la demanda biológica de oxígeno se realizó por el método de incubación por 5 días.

2.9.2 Producción y duración de ciclo

Para cumplir la demanda de agua de producción se calculó la cantidad de agua que filtra el sistema y la duración del ciclo de filtrado, para calcular la producción y el ciclo de filtrado de

agua se dividió los sistemas de filtrados en tres, los cuales se ven evidenciados en la ilustración 11.

Para los cálculos de la producción de agua se utilizó un caudalímetro ZJ-LCD-M de volumen programable de la marca LOUCHEN ZM, (ANEXOS I) y con la ayuda del análisis de dureza (volumétrico con EDTA), se calculó la dureza y el caudal para diferentes intervalos de volumen, los análisis se realizaron en condiciones similares, con los filtros de intercambio iónico completamente regenerados hasta un periodo de agotamiento del filtrado, los intervalos de volumen fueron de 250mL, las muestras fueron tomadas hasta llegar a una saturación acumulada para el tanque Tk-102 de máximo 150mg/L y para la producción de 20mg/L, la duración se determinó para los 3 sistemas de filtrados.

Para calcular la duración del ciclo se utilizó la siguiente ecuación:

$$Tiempo\ de\ ciclo = \frac{Volumen\ filtrado}{Caudal\ de\ filtracion} + Tiempo\ de\ regeneracion \quad Ecuación\ 6$$

2.9.3 Capacidad del filtrado de intercambio iónico

La capacidad total de una muestra de resina es el número de sitios (grupos activos) donde tiene lugar el intercambio de iones, la capacidad de la resina se expresa en normalidad equivalente por litro de resina (eq/L). Este parámetro lo proporciona el fabricante en la ficha técnica de la resina para que el usuario pueda calcular otros parámetros que dependen de la condición de operación. (ANEXO J y K).

La capacidad total es en un caso ideal donde la resina está completamente regenerada al principio y que, durante un periodo de operación se agota totalmente de forma uniforme, esto se puede evidenciar en la figura 12. La capacidad operativa del filtrado es menor ya que el intercambio no ocurre de forma uniformemente hacia abajo, además otro factor que se ve evidenciado es que la resina no está completamente regenerada al principio del ciclo.

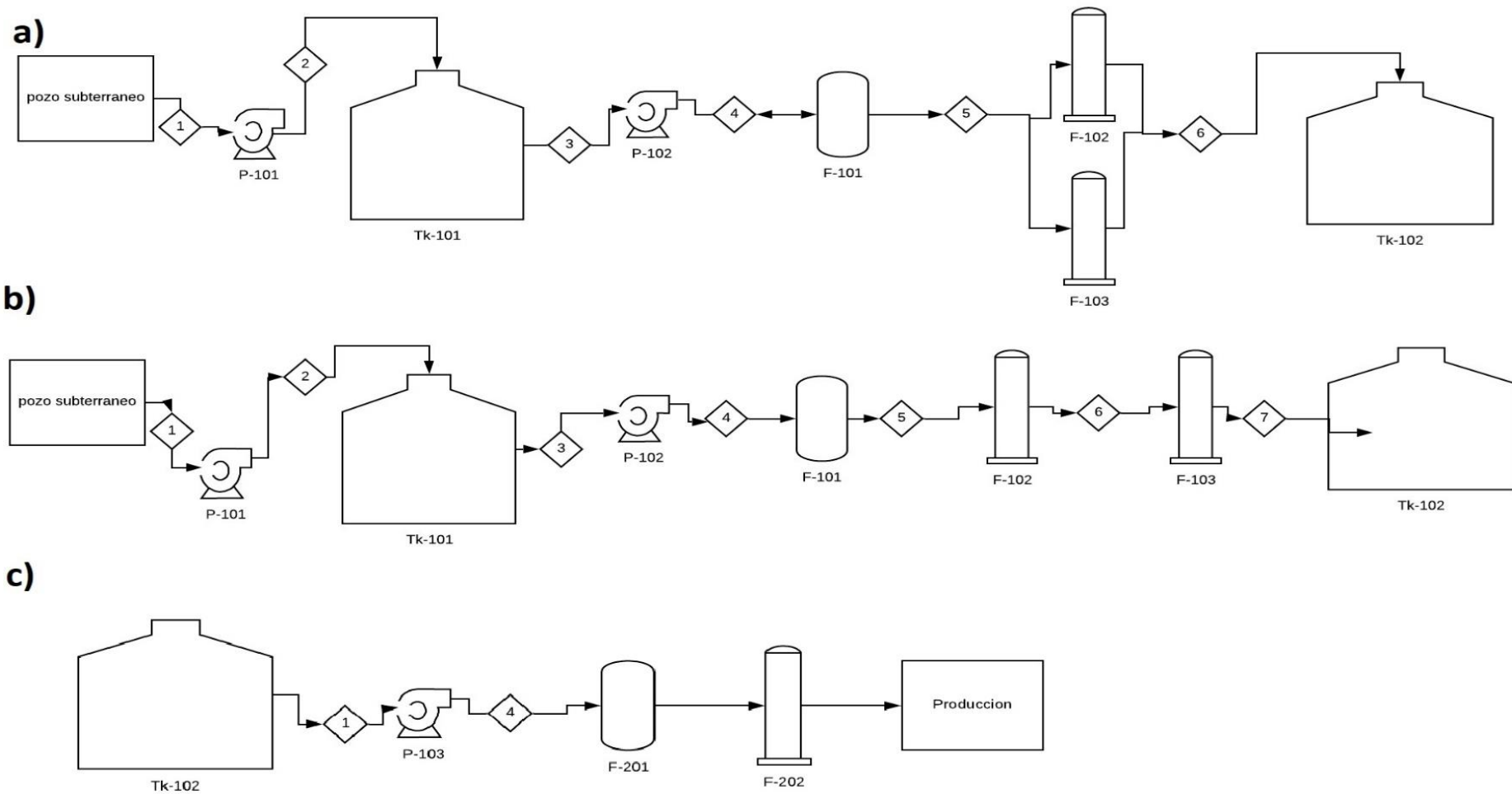


Figura 11: a) Sistema de filtrado en serie b) Sistema de filtrado en paralelo c) Sistema de filtrado final

Fuente: [autor]

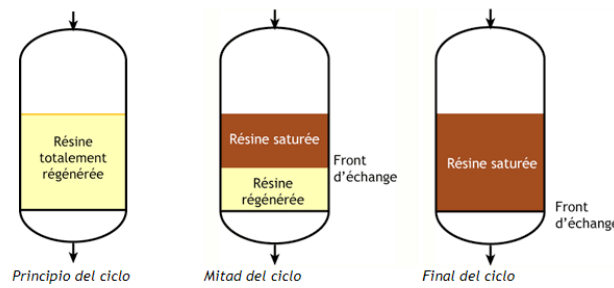


Figura 12: Ciclo de intercambio iónico

Fuente: [6].

2.9.3.1 Análisis de capacidad Operativa de los sistemas de filtrado

Con el objetivo de mejorar el sistema de filtrado se calculó la capacidad operativa de la resina mediante el siguiente balance en el equipo de intercambio iónico como se muestra en la figura 13.

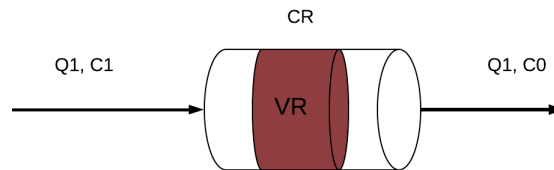


Figura 13: Filtro de intercambio iónico

Fuente: [autor]

Aplicando la ley de la conservación de la materia:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Acomulacion} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Entrada} \\ \text{al sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{salida} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{generacion} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{consumo} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} \text{ Ecuación 7}$$

En el sistema no hay generación ni consumo, entonces el balance queda

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Acomulacion dentro del sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Entra al sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Sale del sistema} \end{array} \right\}$$

En función del caudal y concentración:

$$VR \frac{dCR}{dt} = C1 * Q1 - C0 * Q1$$

Factorizando y separando variables

$$dCR = \frac{(C1 - C0) * Q1}{VR} dt$$

Integrando desde un tiempo cero donde la resina no ha intercambiado iones, por lo que aún está en su forma iónica Na⁺, en consiguiente, la concentración de calcio y magnesio retenidas es cero, hasta un tiempo t, donde la resina ha dado su capacidad para intercambiar los iones de sodio por los de calcio y magnesio se tiene la siguiente ecuación para calcular la capacidad de la resina.

$$\int_0^{Cr} dCR = \frac{(C1 - C0) * Q1}{VR} \int_0^t dt$$

Integrando:

$$CR = \frac{(C1 - C0) * V}{VR} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

CR= Capacidad de la resina en meq/L

C1= Dureza inicial en meq/L

C0= Dureza Final en meq/L

VR= volumen de la resina en litros

V= volumen filtrado en litros

La capacidad operativa se calculó para los 3 sistemas de filtrado propuestos en la ilustración 11, además se graficó el comportamiento del filtro Volumen filtrado vs dureza. Este procedimiento se realizó por duplicado.

2.10 Lavado y Regeneración de filtro de intercambio iónico

Con el objetivo de aumentar la producción y calidad del agua se calculó el tiempo y la concentración de la salmuera que necesita el filtro de resina para regenerarse completamente.

2.10.1 Tiempo de regeneración

Los filtros actuales constan de 4 procesos para la regeneración, en el caso del filtro F-202 el proceso de regeneración se realiza automático ya que la válvula es eléctrica, los filtro F-102 y F-103 las válvulas son manuales (ANEXO L). Los procesos de regeneración para los filtros manuales constan de las siguientes etapas:

- Lavado en contraflujo
- Salmuera lenta
- Llenado de tanque
- Enjuague rápido
- Servicio

Para calcular el tiempo de regeneración de los filtros F-102 y F-103 se utilizó la siguiente ecuación

$$T_{Regeneracion} = T_{lavado\ en\ contraflujo} + T_{salmuera\ lenta} + T_{llenado\ de\ tanque} + T_{enjuague\ rapido}$$

Los tiempos de lavado en contra flujo y enjuague rápido están establecidas en 10 minutos según las características del filtro, la ecuación se resume en:

$$T_{Regeneracion} = T_{salmuera\ lenta} + T_{llenado\ de\ tanque} + 20min \quad Ecuación\ 9$$

Para calcular los tiempos de salmuera lenta se tuvieron en cuenta el volumen de resina y las condiciones de funcionamiento recomendadas por el proveedor de la resina, con el caudal y sabiendo que para regenerar 1L de resina se necesita de 2 L de solución se tiene la siguiente ecuación.

$$T_{salmuera\ lenta} = \frac{Q_{lento}}{V_{s/n}} \quad Ecuación\ 10$$

El tiempo de llenado se calcula según el volumen de solución que se va a utilizar según las especificaciones de la resina. Para calcular el tiempo de llenado se utilizó la ecuación 11 sabiendo que el caudal para llenado de tanque es dos veces el caudal lento.

$$T_{brine\ refill} = \frac{Q_{rapido}}{V_{s/n}} \quad Ecuación\ 11$$

El tiempo para el sistema de filtrado final se encuentra establecido por el tiempo programado, para los sistemas en serie y paralelo se realizaron los cálculos del tiempo de regeneración, teniendo en cuenta que el sistema de serie los filtros F-102 y F-103 no se pueden regenerar simultáneamente.

2.10.2 Concentración del regenerante

Con el fin objetivo de disminuir los costos de operación se determinó la concentración óptima del regenerante, realizando pruebas de capacidad operativa a nivel de laboratorio mediante el montaje experimental que se muestra en la ilustración 14, utilizando como regenerante salmuera a diferentes concentraciones, según el rango de las especificaciones operativas de la resina.

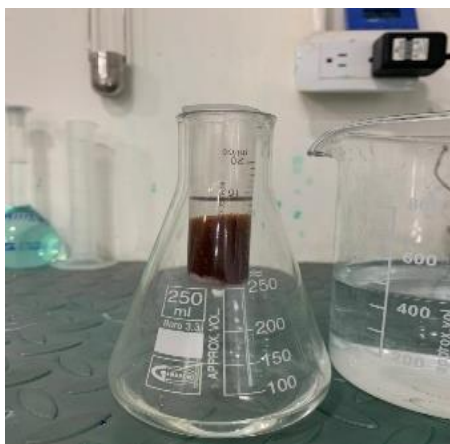


Figura 14: Montaje experimental para la determinación de la capacidad operativa de la resina

Fuente: [autor].

Para determinar la concentración óptima se realizaron 3 soluciones a 8, 12 y 16 % peso/peso de sal, se tomaron 10mL de resina completamente saturada y se introdujeron en la solución aproximadamente durante 1 h, luego de que la resina esta regenerada se procedió a lavar para finalmente hacer la prueba de capacidad operativa.

2.11 Análisis de datos

Los datos fisicoquímicos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza con un 95 % de confianza, con el fin de comprobar la hipótesis de que las variables estudiadas son

significativamente diferentes (H_0 =buscar la hipótesis nula y H_a = alternativa) aplicando ANOVA un factor. Así mismo se realizó un análisis de Diferencia Mínima Significativa (DMS) con un 95% de confianza para establecer las diferencias de los métodos de filtración. Para dichos análisis estadísticos se empleó el paquete estadístico IBM SPSS versión de prueba.

3. RESULTADOS Y ANALISIS

3.1 Análisis fisicoquímico del recurso hídrico

A continuación en la tabla 8, se muestran los resultados del análisis fisicoquímico del pozo de la zona franca, realizadas por Biologística S.A.S, donde las muestras analizadas no cumplen con los rangos requeridos por la resolución 2115 de 2007 [49] para el consumo humano. Los parámetros que no cumplen son: calcio, dureza total, magnesio, manganeso y sulfatos.

Tabla 8: Resultados de análisis fisicoquímico del recurso hídrico

Parámetro	Método	Pozo	Limite consumo humano	Valores aceptados por la empresa
Alcalinidad	Titulación	87.8	200	cumple
Aluminio	Absorción atómica	0.1	0.2	cumple
Calcio	Titulométrico EDTA	560.509	60	No cumple
Color aparente	Espectrofotométrico	7	15	cumple
Cloro residual	Titulación	0.04	3	cumple
Cloruros	Cromatografía iónica	200.51	250	cumple
COT	persulfato	2.4	5	cumple
Dureza total	Titulométrico EDTA	710	300	No cumple
Fluoruros	Cromatografía iónica	0.175	1	cumple
Fosfatos	Cromatografía iónica	0.393	0.5	cumple
Hierro	Absorción atómica	0.03	0.3	cumple
Magnesio	Titulométrico EDTA	0.181	36	No cumple

Manganeso	Absorción atómica	29.1	0.1	No cumple
Nitratos	Cromatografía iónica	0.357	0.1	cumple
Molibdeno	Absorción atómica	0.3	0.07	cumple
pH	Electrométrico	7.16	9	cumple
Sulfatos	Cromatografía iónica	388.25	250	No cumple
Turbiedad	Nefelométrico	1.7	2	cumple
Zinc	Absorción atómica	0.02	3	cumple

Fuente: [Autor]

3.1.1 Características y condiciones de operación del pozo subterráneo

El acueducto de la empresa Cosmogreen, está conformado por un pozo subterráneo de revestimiento de anillos de concreto con una profundidad de 12,3 metros, el agua es bombeada por líneas de tubería de PVC al tanque de almacenamiento, cuya capacidad es de 80m³. Las características se detallan en la tabla 9.

Tabla 9: Características del pozo de Cosmogreen

Característica	pozo
Caudal<L/s>	1.2
Potencia de bombeo	1 HP
Tubería	PVC
Diámetro <m>	2.1
Profundidad <m>	12.3
Tipo de pozo	aljibe, de gran diámetro

Fuente: [Autor]

3.2 Análisis de la demanda de agua para producción

Con el fin de establecer la demanda de agua para producción, se determinó la cantidad de agua que se gasta para la elaboración de 1 litro de cada producto. Para producir 1 litro de

color denso se necesita 660 mL de agua, y para producir 1 L de limpiador multiuso 900 mL. Se calculó la demanda total de agua para una semana de producción como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 10: Demanda de agua para producción

producto	Producción actual		Producción a futuro	
	Cantidad de producto <L>	Cantidad de agua por <L>	Cantidad de producto <L>	Cantidad de agua por <L>
Cloro denso	6000	3960	12000	7920
Limpiador citronela	1200	1080	6000	5400
Producción industrial	2000	1600	6000	4800
	Total de agua	6640	Total de agua	18120

Fuente: [Autor]

La cantidad de agua para la producción actual por semana son 6640 L, y para un futuro la empresa necesitará 18120 L, ya que la producción de cloro denso y limpiador se estima que en un futuro a corto plazo se duplique.

3.3 Caracterización del agua del sistema de pre-filtrado.

Con el fin ajustar el agua a las condiciones de la empresa, se debe precipitar la mayor cantidad de carbonato de calcio, por lo tanto, se determinaron los gramos mediante la ecuación 5, de la siguiente forma.

$$gCa(OH)_2 = 1.85gCa + 6.1gMg$$

$$gCa(OH)_2 = 1.85 * (0.710) + 6.1 * (0.00018)$$

$$gCa(OH)_2 = 1.0380g$$

Se propusieron 4 intervalos de adición de cal uno menor al peso calculado y 3 en exceso con el fin de ayudar a la precipitación de dureza permanente. Se procedió a realizar la prueba de jarras para evidenciar los diferentes comportamientos de la precipitación, y sus diferentes análisis.

Con el fin de conocer si la adición de cal, influye estadísticamente en las propiedades de dureza, S.S, turbidez, pH y conductividad se prosiguió a realizar el análisis de varianza ANOVA. En la tabla 12, se puede observar que existe diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$) en los valores evaluados.

Tabla 11. Análisis de Varianza (ANOVA) de la adición de cal en el pre-filtrado

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Peso precipitado	Entre grupos	11.073	3	3.691	49.505	.000
	Dentro de grupos	.596	8	.075		
	Total	11.669	11			
Dureza	Entre grupos	36691.688	3	12230.563	97.667	.000
	Dentro de grupos	1001.821	8	125.228		
	Total	37693.509	11			
pH	Entre grupos	1.420	3	.473	59.235	.000
	Dentro de grupos	.064	8	.008		
	Total	1.484	11			
Conductividad	Entre grupos	762277.667	3	254092.556	688.598	.000
	Dentro de grupos	2952.000	8	369.000		
	Total	765229.667	11			
Turbidez	Entre grupos	1.834	3	.611	52.602	.000
	Dentro de grupos	.093	8	.012		
	Total	1.927	11			
S.S	Entre grupos	.009	3	.003	1.898	.208
	Dentro de grupos	.012	8	.001		
	Total	.020	11			

Nota: $p < 0,05$ indica diferencia significativa.

Fuente: [autor]

En la tabla 12, se muestran los resultados promedio de la cantidad de calcio adicionada y los valores de los análisis fisicoquímicos realizados al agua luego de la precipitación y filtrado, concluyendo que si existe diferencia mínima significativa entre las diferentes pruebas que se realizaron, menos en los sólidos suspendidos.

Tabla 12. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas según la adición de cal en la etapa de pre-filtrado

Parámetro	Muestra 1	muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Cal adicionada <g>	0.9413 ± 0.0061	1.1364 ±0.0032	1.3577 ±0.0107	1.5377 ±0.0107
Peso precipitado <g>	1.4498 ± 0.4048	2.3201 ±0.2972	2..997467±0.1185	4.0768 ±0.1785
Dureza<mg/L>	341.9775 ±10.4177	365.3321 ± 13.2407	452.0776 ± 10.4177	472.0958 ± 10.4177
Sólidos suspendidos (S.S) <mg/L>	0.1540 ± 0.3072	0.13633 ± 0.0214	0.1796 ± 0.0471	0.2068 ± 0.04853
Turbidez <NTU>	7.9567 ± 0.1222	8.1533 ± 0.0964	8.6400 ± 0.9644	8.9467 ± 0.13614
pH	10.9667 ± 0.5859	11.39 ± 0.1442	11.73 ± 0755	11.8533 ± 0.4509
Conductividad<µs/cm>	1184 ± 15.1	1372.33 ± 20.404	1681.33 ± 18.583	1825.67 ± 22.053

Fuente: [autor] n=3, promedio ± desviación.

El tratamiento que redujo la dureza en mayor proporción fue con la muestra 1, esto es debido a que la dureza en mayor proporción es aparente ya que en excesos de cal la dureza no tuvo cambios significativos. también es debido a que la dureza en gran proporción es dureza cálcica y no al magnesio ya que según la relación estequiométrica se necesita 6.1 veces cal para precipitar el magnesio [34].

Para precipitar el carbonato calcio se necesita de un incremento del pH se evidenció en todas las muestras un pH relativamente alto. Para poder disminuir la solubilidad del carbonato, por lo tanto, se llega a un punto de saturación, esta saturación genera una alta presencia de sólidos suspendidos y por lo consiguiente un aumento en la turbiedad que se ve evidenciada en los resultados.

3.4 Análisis de los sistemas de filtrado

Al analizar las propiedades fisicoquímicas del sistema de filtrado, se puede evidenciar en la tabla 13, que existe diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$) entre los dos métodos de filtrado. Se puede ver que el tratamiento en paralelo tiene un aumento en la dureza esto debido a que no se llevaba un control de la capacidad de filtrado individual, donde se llegaba a una saturación más rápida del filtro F-102 que el filtro F-103 dejando pasar agua con una

mayor dureza, este aumento en la saturación del filtro F-102 puede ser debida a el modo de operación utilizado anteriormente ya que este filtro recibía primero el agua hasta su saturación, para así comenzar el proceso de filtración del filtro F-103, esta permanente saturación del filtro pudo disminuir su capacidad de intercambio iónico del filtro. Con la ayuda del cambio del tratamiento a paralelo se puedo calcular la capacidad de intercambio iónico que se muestra en el siguiente inciso.

Tabla 13. Análisis de Varianza (ANOVA) de los sistemas de filtrado

Parámetro		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
S.S	Entre grupos	0.000	3	0.000	1304.000	0.000
	Dentro de grupos	0.000	8	0.000		
	Total	0.000	11			
Turbidez	Entre grupos	7.167	3	2.389	25.026	0.000
	Dentro de grupos	0.764	8	0.095		
	Total	7.931	11			
pH	Entre grupos	2.397	3	0.799	684.848	0.000
	Dentro de grupos	0.009	8	0.001		
	Total	2.406	11			
Conductividad	Entre grupos	98447.583	3	32815.861	1158.207	0.000
	Dentro de grupos	226.667	8	28.333		
	Total	98674.250	11			
DQO	Entre grupos	112.917	3	37.639	30.111	0.000
	Dentro de grupos	10.000	8	1.250		
	Total	122.917	11			
DBO	Entre grupos	5.947	3	1.982	475.733	0.000
	Dentro de grupos	0.033	8	0.004		
	Total	5.980	11			
Dureza	Entre grupos	499520.382	3	166506.794	25463.194	0.000
	Dentro de grupos	52.313	8	6.539		
	Total	499572.695	11			

Nota: $p < 0,05$ indica diferencia significativa.

Fuente: [autor]

En la tabla 14 se muestra los resultados del análisis fisicoquímico de los tratamientos de filtrado que se realizaron en los tanques de almacenamiento teniendo como referencia inicial el tanque Tk-101. Además, se muestran los resultados del tanque Tk-102 para diferenciar los tratamientos de filtrado en serie y en paralelo acumulando el filtrado para su análisis. Por otra parte, se presenta solo un análisis en la sección final de filtrado ya que el tanque Tk-102 al ser de gran volumen no varía sus características de referencia, teniendo como características de referencia el Tk-102 en serie ya que es el que se ha ido usando anteriormente en la empresa.

Tabla 14. Resultados del análisis fisicoquímico de los sistemas de filtrado

Resultados del análisis fisicoquímico de los sistemas de filtrado				
Parámetro	Tk-101	Tk-102 Serie	Tk-102 Paralelo	A producción
Sólidos suspendidos<mg/L>	0.0012 ± 0.001	0.0000 ±0.000	0.0001 ±0.001	0.0000 ± 0.000
Turbidez <NTU>	9.5067 ± 0.381	8.3767 ±0.355	8.9300 ±0.113	7.4100 ±0.312
Dureza<mg/L>	557.41 ± 0.381	141.22 ± 1.016	157.53 ± 2.147	13.653 ±0.460
pH	7.356 ±0.005	8.31 ±0.065	8.513 ±0.006	8.2800 ±0.173
Conductividad<μs/cm>	1403.33 ±5.774	1595.67 ±5.132	1596.67 ±5.774	1635.33 ± 4.509
DQO <mgO ₂ /L>	18.33 ± 0.577	15.33 ±1.528	18.00 ±0.000	10.67 ±1.528
DBO5 <mgO ₂ /L>	1.8 ±0.100	0.267 ±0.077	0.333 ±0.577	0.000 ±0.00

Fuente: [autor] n=3, promedio ± desviación.

Se realizaron los análisis de demanda bioquímica de oxígeno con el fin de descartar la posibilidad de que los productos se puedan contaminar por algún microorganismo o bacteria, esto debido a que algunos productos usan tensoactivos orgánicos, con los resultados obtenidos de DQO Y DBO y comparándolos con la norma de calidad de agua y control de descargas AG-CC-01 los valores se encuentran por debajo de los parámetros fisicoquímicos y biológicos presentes en cuerpos hídricos superficiales [50]. Así mismo, se evidencia que hay una disminución significativa en los sólidos suspendidos, turbidez y pH tras ser filtrados por los diferentes sistemas.

3.4.1 Resultados de la capacidad operativa del filtrado de intercambio iónico

En las gráficas 1 y 2, se muestran los resultados para la variación de la dureza a diferentes volúmenes de filtrado, esto con el fin de calcular el volumen máximo de agua filtrada.



Gráfica 1: Filtrado de intercambio iónico en serie

Fuente: [autor]

Para el sistema de filtrado en serie el volumen máximo de filtrado fue de 1000 L, donde se puede ver el comportamiento del filtro F-103, el que al estar en serie dio lugar a que la dureza a la salida de este filtro no variara hasta que el F-102 llegó a saturación, por otra parte, el volumen de saturación del filtro F-102 fue de aproximadamente 500 L.

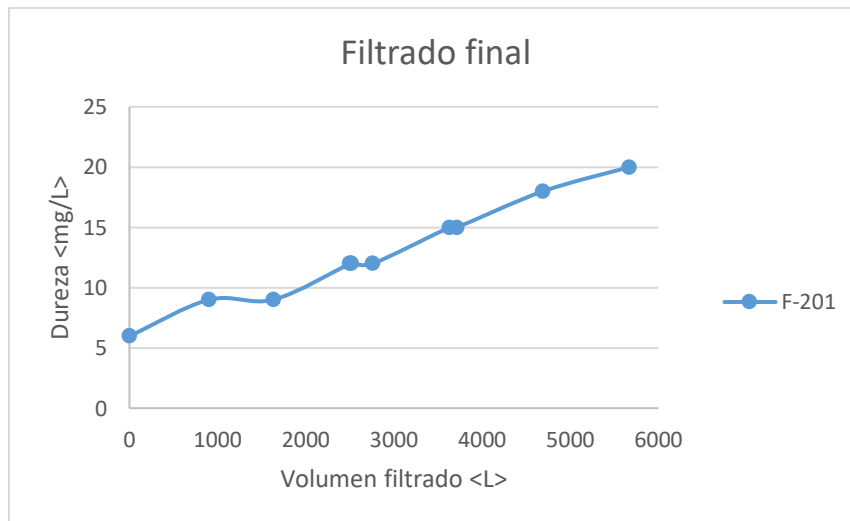
Para el sistema de filtrado en paralelo que se muestra en la gráfica 2 se muestra un volumen de filtrado de 1200 L, esta variación con respecto a la filtración en serie, es debido a que el F-103 solo es usado hasta que el F-102 llega a saturación sin necesidad de estar pasando por este filtro, comenzando su ciclo de filtración estando completamente regenerado. El volumen de filtrado del F-103 es de 750 L, la variación en el volumen de filtrado, es debido a la operación del sistema de filtrado que se tenía anteriormente, es decir gastando más el Filtro F-102 que el Filtro F-103.



Grafica 2: Filtrado de intercambio iónico en paralelo

Fuente: [autor]

Para el sistema de filtrado final se ve una gran diferencia en el volumen de filtrado, esto es al poco uso que se le ha dado al equipo, al ser un sistema de filtrado nuevo. La capacidad de intercambio iónico es mucho mayor la variación del sistema tal como se evidencia en la gráfica 3.



Grafica 3: Filtrado de intercambio iónico final

Fuente: [autor]

Para calcular la capacidad de cada filtro se tuvieron en cuenta la capacidad de filtrado hasta su saturación mediante la ecuación 8, en la tabla 15 se muestran los resultados de la capacidad operativa de cada filtro.

Tabla 15: Resultados de la capacidad operativa de cada sistema de filtrado

Parámetro	Serie	Paralelo	Final
Dureza inicial<meq/L>	9.78	9.84	4.5
Dureza Final<meq/L>	3.42	3.5	0.4
Volumen filtrado<L>	1000	1250	5250
Volumen de resina <L>	56	56	25
Capacidad <eq/L>	0.113571429	0.1415179	0.861

Fuente: [autor]

Al analizar la capacidad operativa de cada sistema de filtrado se pudo evidenciar que el sistema en paralelo tiene mayor capacidad de intercambio, esto se debe a que este sistema usa por separado cada filtro, y aumenta el rendimiento del filtro F-103 al no estar en uso, por lo tanto, no se va gastando su capacidad de intercambio sin necesidad. Además, guarda esa capacidad cuando el filtro F-102 llega a saturación, comenzando su proceso de filtración con resina completamente regenerada.

El sistema de filtrado final tiene una capacidad operativa mucho mayor, a razón que este sistema de filtración tiene poco ciclo de uso a diferencia del primer sistema de filtrado, el cual lleva una operación de alrededor de 2 años, por lo tanto, la capacidad de la resina va disminuyendo a medida que se usa.

3.4.2 Tiempo de regeneración

En la tabla 16 se muestran la comparación de los tiempos de regeneración que se tenía anteriormente y el método de regeneración propuesto.

Tabla 16: Resultados de tiempo de regeneración

Proceso	Serie	Paralelo
Lavado en contra flujo <min>	15	10
Salmuera lenta <min>	60	35
Llenado del filtro <min>	20	15
Enjuague rápido <min>	15	10
Tiempo por filtro <min>	110	70
Tiempo total <min>	220	70

Fuente: [autor]

Se puede demostrar que por cada filtro se necesita de 110 minutos para regenerarse, teniendo un total de 220 minutos para regenerar todo el sistema de filtrado. Para el sistema de regeneración propuesto, al estar el sistema en paralelo la regeneración se realiza paralelamente ya que el flujo está dividido, teniendo un tiempo de regenerado mucho menor al actual, este tiempo se ve reflejado en el tiempo de duración del ciclo de filtrado que se calcula a continuación.

3.4.3 Resultado de la duración del ciclo

En la siguiente tabla, se muestran los caudales de los sistemas de filtrado y el tiempo del ciclo de los diferentes sistemas de filtrado

Tabla 17: Duración del ciclo

Parámetro	Serie	Paralelo	Final
caudal de filtrado <L/min>	3.5	3.8	10.2
Volumen Filtrado <L>	1000.0	1250.0	5250.0
Tiempo de Filtrado <min>	285.7	328.9	514.7
Tiempo de Regeneración <min>	220.0	70.0	45.0
Tiempo de ciclo <h>	8.4	6.6	9.3

Fuente: [autor]

Mediante los resultados de la tabla 17 se puede evidenciar que los caudales del sistema paralelo y en serie son similares, ya que la caída de presión del sistema de filtrado de intercambio iónico es insignificante aumentando solo 0.3 L/min. El tiempo de filtración del sistema en paralelo es mayor, puesto que el volumen de filtrado es mayor, así mismo, se evidencia una mejora en el ciclo de filtrado en paralelo a diferencia del sistema de filtrado en serie. Para filtrar 1000 L, se requiere un tiempo de 8.4 horas a diferencia del sistema en paralelo que en 6.6 horas se filtran 1250 L.

3.4.4 Producción de agua total

En la siguiente tabla se muestra la producción de agua por semana teniendo como horarios laborales de lunes a sábado de 8 am a 6 pm para los sistemas propuestos. No se tuvo en cuenta la producción para el sistema de filtrado final ya que este sistema de filtrado depende de la producción de la primera parte del sistema.

Tabla 18: Producción de agua

Parámetro	Serie	Paralelo
Ciclo de filtrado	8.4	6.6
Ciclos por día	1	2
Volumen por día<L>	1000	2500
Volumen por semana<L>	6000	15000

Fuente: [autor]

En el sistema de filtrado en paralelo por día puede realizar dos ciclos, a diferencia del sistema en serie que se limita a un ciclo por día. Teniendo una mejora evidente en la producción de agua, se puede afirmar que se ha duplicado la producción de agua.

3.4.4 Concentración del regenerante

Con el fin de mejorar el sistema de filtración se calculó las capacidades de la resina en diferentes concentraciones de salmuera, esto con el fin de disminuir los costos en el proceso de regeneración. Actualmente, se adicionaba 25 kg de hidrosal alcanzando aproximadamente 5 ciclos, con el fin de mejorar este sistema de regeneración, se tomaron 3 valores de concentración de salmuera, los cuales fueron establecidos por la ficha técnica de la resina. Seguidamente se evaluó la capacidad para 10 mL de resina. En la tabla 20 se

muestran los análisis de varianza para las concentraciones de regenerante, y en la tabla 19 se muestran los resultados de las capacidades de la resina a diferentes concentraciones de regenerante.

Tabla 19: Resultados de la capacidad de la resina a diferentes concentraciones de regenerante

Concentración <%p/p>	Volumen filtrado <L>	Dureza inicial <meq/L>	Dureza final <meq/L>	Capacidad <eq/L>
6	1.475 ± 0.353	4.450 ±0.707	2.335 ±0.007	0.322 ± 0.002
8	1.725 ± 0.353	3.350 ± 0.707	1.195 ±0.007	0.3845 ± 0.007
12	2.005 ± 0.007	3.155 ±0.707	1.137 ± 0.004	0.402 ± 0.002
16	2.000 ± 0.000	3.175 ± 0.007	1.14 ± 0.000	0.4075 ± 0.007

Fuente: [autor]

Tabla 20: Análisis de Varianza (ANOVA) de concentración de regenerante

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Volfiltrado	Entre grupos	.387	3	.129	202.111	.000
	Dentro de grupos	.003	4	.001		
	Total	.389	7			
Dureza inicial	Entre grupos	2.291	3	.764	302.422	.000
	Dentro de grupos	.010	4	.003		
	Total	2.301	7			
Dureza final	Entre grupos	2.085	3	.695	23554.955	.000

	Dentro de grupos	.000	4	.000		
	Total	2.085	7			
Capacidad	Entre grupos	.009	3	.003	724.784	.000
	Dentro de grupos	.000	4	.000		
	Total	.009	7			

Nota: $p < 0,05$ indica diferencia significativa.

Fuente: [autor]

Con los resultados obtenidos de la tabla 20, se puede establecer que la mejor concentración que aumenta la capacidad de la resina, son las soluciones regenerante de 12% y 16%, teniendo unas capacidades de intercambio relativamente similares. Las concentraciones de 6% y 8% no alcanzaron a filtrar 2 L, por lo cual, la capacidad de la resina es menor. Se seleccionó como concentración de regenerante la concentración del 12 % por ciclo, ya que los resultados post hoc, DMS, con respecto a 16% no son significativos (ANEXO M) y el ahorro de sal es considerable.

CONCLUSIONES

La empresa Cosmogreen produce por día 1000 L de agua lo que corresponde a un tratamiento de un ciclo por día, con una concentración de iones calcio y magnesio de 710 mg/L, valor por el que se clasifica como “agua muy dura”, en este estudio se propusieron y evaluaron otros sistemas de tratamiento que demostraron reducciones significativas de la dureza, a continuación, se describe el sistema denominado en paralelo con el que se obtuvieron los mejores resultados:

El sistema propuesto “en paralelo” disminuyó el tiempo de regeneración de 220 a 70 minutos para el lavado, reflejado en la producción de agua filtrada que pasó de 6000 L / semana a 15000 L/semana, que es la cantidad que se requiere, evidenciando una mejora considerable, y el agua filtrada alcanzó los rangos de dureza exigidos por la empresa. El sistema de lavado fue mejorado, porque no existía un control en los lavados, este nuevo sistema disminuyó el tiempo de regeneración de la resina y permitió la regeneración de los filtros simultáneamente.

Las pruebas para el pre-filtrado dieron como resultado una disminución en la dureza, pero un aumento considerable en los sólidos suspendidos, turbidez y pH, por lo que es necesario un tratamiento adicional al pre-filtrado ya que el agua que se obtiene está en saturación por lo que es necesario disminuir el pH, para así estabilizar la solución, este tratamiento consta de un filtrado para separar el precipitado, recarbonatación o de adición de ácidos para estabilizar el pH.

La demanda biológica y química de oxígeno presente en los tanques, para todos los sistemas, cumple con la normativa de calidad del agua y requerimientos de la empresa, garantizando que en los tanques y tubería no se presente algún tipo de incrustaciones por algas o microorganismos que puedan afectar la calidad del agua, la turbidez, el pH, conductividad, turbiedad y sólidos suspendidos.

Se mejoró el sistema de regeneración, calculando la concentración óptima del regenerante teniendo resultados satisfactorios a una concentración de salmuera al 12%, al mejorar la capacidad de la resina a 0.4 eq/L.

RECOMENDACIONES

La capacidad de las resinas de los sistemas de filtrado en serie y en paralelos son muy bajas a diferencia del sistema de filtrado final, debido a que las resinas usadas en estos filtros llevan más de dos años de operación, perdiendo sus sitios activos y disminuyendo la capacidad de las resinas, la capacidad de operación del filtrado final se mantiene baja a diferencia de la capacidad total según la ficha técnica de la resina, por lo que se recomienda principalmente el cambio de la resina de los filtros F-102 y F-103.

Se recomienda realizar estudios más detallados del sistema de pre-filtrado ya que la calidad de agua que produce no es apta para la empresa, por la cantidad de sólidos y turbidez que presenta este sistema, para ellos se adiciona al sistema de filtrado una etapa de regulación del pH esta regulación es posible añadiendo un sistema de recarbonatación luego del tanque de precipitación.

Se recomienda el cambio de la resina de intercambio iónico para los filtros F-102 y F-103 ya que por el uso los sitios activos han disminuido afectando la capacidad del sistema de filtrado, además se recomienda aumentar el caudal de filtración adicionando una segunda bomba al sistema de filtrado inicial o cambiando la bomba existente por el de una mayor capacidad.

Se recomienda adicionalmente realizar mantenimientos constantes a la línea 3 y a la bomba P-101 que conduce el agua del tanque tk-101 a los sistemas de filtrado, ya que por la alta concentración de dureza puede generar incrustaciones en la bomba y la línea disminuyendo el caudal de filtración.

Adicionalmente tener un control en la adición de la hidrosal para así disminuir los costos operativos de los filtros y asegurar una buena regeneración realizando pruebas de dureza luego de cada lavado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. R. Anim-Mensah, W. B. Krantz, and R. Govind, "Studies on polymeric nanofiltration-based water softening and the effect of anion properties on the softening process," *Eur. Polym. J.*, vol. 44, no. 7, pp. 2244–2252, Jul. 2008.
- [2] P. Tirkey, T. Bhattacharya, S. Chakraborty, and S. Baraik, "Assessment of groundwater quality and associated health risks: A case study of Ranchi city, Jharkhand, India," *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 5, pp. 85–100, Sep. 2017.
- [3] C. E. Boyd, C. S. Tucker, and B. Somridhivej, "Alkalinity and Hardness: Critical but Elusive Concepts in Aquaculture," *J. World Aquac. Soc.*, vol. 47, no. 1, pp. 6–41, Feb. 2016.
- [4] Google maps, "Cúcuta – Norte de Santander, Patio de la manzana M Zona Franca," <https://www.google.com/maps/@7.9217568,-72.5007311,15.74z>, 2019. .
- [5] D. Cortijo-Herrera, "Desalcalinización del agua mediante intercambio iónico," *Ing. Ind.*, vol. 0, no. 031, p. 221, 2013.
- [6] J. Cabezas Oruna, "Obtención de agua ultrapura en la industria mediante intercambio iónico," *Paradigmas*, vol. 4, no. 1. pp. 2–8, 2016.
- [7] Y. Hailu, E. Tilahun, A. Brhane, H. Resky, and O. Sahu, "Ion exchanges process for calcium, magnesium and total hardness from ground water with natural zeolite," *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 8, pp. 457–467, Apr. 2019.
- [8] S. Gassara, A. Abdelkafi, D. Quémener, R. Ben Amar, and A. Deratani, "Positively charged and bipolar layered poly(ether imide) nanofiltration membranes for water softening applications," *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 224, no. 9, pp. 1899–1910, Jul. 2015.
- [9] RAE, "DLE: agua - Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario." 2016.
- [10] L. Schweitzer and J. Noblet, "Water Contamination and Pollution," in *Green Chemistry*, 2018, pp. 261–290.

- [11] H. . An, B. . Park, and D. . Kim, “Crab shell for the removal of heavy metals from aqueous solution,” *Water Res.*, vol. 35, no. 15, pp. 3551–3556, Oct. 2001.
- [12] R. Balasubramanian, S. V. Perumal, and K. Vijayaraghavan, “Equilibrium isotherm studies for the multicomponent adsorption of lead, zinc and cadmium onto Indonesian peat,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, no. 4, pp. 2093–2099, Feb. 2009.
- [13] Ministerio de Salud y Protección Social, “Informe Nacional de la Calidad del Agua para Consumo Humano 2016,” p. 557, 2015.
- [14] L. Guzmán, Á. Villabona, C. Tejada, and R. García, “Reducción De La Turbidez Del Agua Usando Coagulantes Naturales: Una Revisión,” *Rev. U.D.C.A Actual. Divulg. Científica*, vol. 16, no. 1, pp. 253–262, 2013.
- [15] J. Jairo, F. Díaz, S. Bermúdez Roa, A. María, and E. Tordecilla, “Efficiency of Moringa Oleífera seed as a natural coagulant to remove turbidity from Sinú river’s water Eficiência da semente Moringa Oleífera como coagulante natural para a remoção da turbidez do rio Sinú,” *Rev. Prod. + limpia*, vol. 9, no. 1, pp. 9–22, 2014.
- [16] I. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, “Turbiedad,” *Inst. Hidrol. Meteorol. y Estud. Ambient.*, p. 2, 2015.
- [17] I. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, “Sólidos Suspendidos Totales En Agua Secados a 103 – 105 °c.,” *Subdirección Hidrol. - Grup. Lab. Calid. Ambient.*, vol. 1, pp. 1–4, 2007.
- [18] A. M. A. Ortiz *et al.*, “Variaciones físico-químicas de la calidad del agua del río Carrizal en Manabí,” *Enfoque UTE*, vol. 10, no. 3, pp. 30–41, 2019.
- [19] republica de colombia Instituto nacional de salud, “Manual analisis fisico quimico aguas.” pp. 1–113, 2011.
- [20] A. Hurlimann and J. McKay, “Urban Australians using recycled water for domestic non-potable use-An evaluation of the attributes price, saltiness, colour and odour using conjoint analysis,” *J. Environ. Manage.*, vol. 83, no. 1, pp. 93–104, Apr. 2007.
- [21] I. F. Ángel Moreira-Romero, “Consideraciones actuales sobre ablandamiento del agua Current Water Softening Considerations Considerações de amaciamento de

- água corrente,” *Dominio las ciencias*, vol. 2, pp. 334–345, 2016.
- [22] C. H. Rodriguez, “Alcalinidad Potenciometria,” *Subdirección Hidrol. - Grup. Lab. Calid. Ambient.*, vol. 1, p. 9, 2005.
- [23] A. Pérez and P. Torres, “Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables,” *Ing. y Compet.*, vol. 10, no. 2, pp. 41–52, 2008.
- [24] I. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, “Dureza Total en Agua con EDTA por Volumetría,” *Programa Fis. Ambient.*, vol. 008, pp. 1–12, 2007.
- [25] Y. Solís-Castro, L. A. Zúñiga-Zúñiga, and D. Mora-Alvarado, “La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica,” *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 31, no. 1, p. 35, Mar. 2018.
- [26] T. de J. V. Marin, “Exploracion de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remocion de dureza que logre la optimizacion tecnica y economica del proceso,” *Tesis para optar a la licenciatura en Ing. Química la Univ. las Américas. Puebla*, vol. 1, pp. 1–70, Dec. 2004.
- [27] L. F. Cardona Palacio, “Modelo simple y generalizado para estimar la entalpía de vaporización de sustancias puras,” *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 11, no. 22, p. 37, Nov. 2017.
- [28] J. Mora Molina, M. P., G. Vatai, and E. Molnar, “Filtración de glicerina de una solución modelo por ósmosis inversa y nanofiltración,” *Tecnol. en Marcha*, vol. 16, no. 4, pp. 7–12, 2003.
- [29] E. W. Tow *et al.*, “Comparison of fouling propensity between reverse osmosis, forward osmosis, and membrane distillation,” *J. Memb. Sci.*, vol. 556, pp. 352–364, Jun. 2018.
- [30] R. Bonner, C. Germishuizen, and S. Franzsen, “Prediction of nanofiltration rejection performance in brackish water reverse osmosis brine treatment processes,” *J. Water Process Eng.*, vol. 32, p. 100900, Dec. 2019.
- [31] A. Masarwa, D. Meyerstein, N. Daltrophe, and O. Kedem, “Compact accelerated precipitation softening (CAPS) as pretreatment for membrane desalination II. Lime

- softening with concomitant removal of silica and heavy metals,” *Desalination*, vol. 113, no. 1, pp. 73–84, 1997.
- [32] J. Kemperl and J. Maček, “Precipitation of calcium carbonate from hydrated lime of variable reactivity, granulation and optical properties,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 93, no. 1, pp. 84–88, Sep. 2009.
- [33] K. Ishikawa, G. Kawachi, K. Tsuru, and A. Yoshimoto, “Fabrication of calcite blocks from gypsum blocks by compositional transformation based on dissolution–precipitation reactions in sodium carbonate solution,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 72, pp. 389–393, Mar. 2017.
- [34] E. Chibowski, L. Hołysz, A. Szcześ, and M. Chibowski, “Precipitation of calcium carbonate from magnetically treated sodium carbonate solution,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 225, no. 1–3, pp. 63–73, Sep. 2003.
- [35] A. Azdarpour, M. Asadullah, E. Mohammadian, H. Hamidi, R. Junin, and M. A. Karaei, “A review on carbon dioxide mineral carbonation through pH-swing process,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 279. Elsevier, pp. 615–630, 01-Nov-2015.
- [36] S. Atashin, R. A. Varin, and J. Z. Wen, “Directed precipitation of anhydrous magnesite for improved performance of mineral carbonation of CO₂,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 3362–3372, Aug. 2017.
- [37] M. M. Hassan and C. M. Carr, “A critical review on recent advancements of the removal of reactive dyes from dyehouse effluent by ion-exchange adsorbents,” *Chemosphere*, vol. 209. Elsevier Ltd, pp. 201–219, 01-Oct-2018.
- [38] V. Morin, S. Garrault, F. Begarin, and I. Dubois-Brugger, “The influence of an ion-exchange resin on the kinetics of hydration of tricalcium silicate,” *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 10. Elsevier Ltd, pp. 1459–1464, 2010.
- [39] M. Herrera-Calderón and G. Palomino-Downham, “Resinas de intercambio iónico : Desarrollo tecnológico aplicado para la eliminación de olor del metanol puro Technological development : Use of ionic exchange resins for the elimination of odor vapors from pure methanol,” *Tecnol. Ciencia, Educ.*, vol. 27, pp. 24–35, 2012.
- [40] F. Liguori, C. Moreno-Marrodan, and P. Barbaro, “Metal nanoparticles immobilized

on ion-exchange resins: A versatile and effective catalyst platform for sustainable chemistry,” *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, vol. 36, no. 8. Science Press, pp. 1157–1169, 20-Aug-2015.

- [41] T. Gomes, “Ficha Técnica Filtro de Resina Ionica,” *Rev. Eixos Tech*, vol. 1, no. 2, p. 51, 2015.
- [42] R. Hernandez Sampieri, *Metodología de la investigación*, Sexta edic. 2014.
- [43] J. L. Devore, *Probabilidad y Estadística para ingeniería y ciencias*, Septima ed. 2008.
- [44] Instituto N. de salud República de Colombia, *Manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano para análisis de laboratorio ISBN: 978-958-13-0147-0*. 2011.
- [45] I. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, “pH EN AGUA POR ELECTROMETRIA,” *Inst. Hidrol. Meteorol. y Estud. Ambient.*, no. 20, pp. 1–4, 2009.
- [46] I. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, “Conductividad Electrica en aguas por el metodo electrometrico,” vol. 2, p. 7, 2006.
- [47] I. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, “Demanda química de oxigeno por reflujó cerrado y voluntaria,” *Inst. Hidrol. Meteorol. y Estud. Ambient.*, p. 11, 2007.
- [48] I. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, “Demanda Bioquímica De Oxígeno – 5 Días En Aguas,” 2007.
- [49] Ministerio de la Protección Social and Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial I, “Resolución Numero 2115,” *Minambiente*, p. 23, 2017.
- [50] S. del estado De and medio ambiente y recursos Naturales, “Norma de calidad del agua y control de descargas ag-cc-01.”