



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 02 de Junio de 2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Juan Manuel Quiza Gáfaró, con C.C. No. 1.075'235.880,
_____, con C.C. No. _____,
_____, con C.C. No. _____,
_____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

titulado Evaluación de la capacidad de adsorción de fluoruros que posee la alúmina activada sintetizada a partir de material de aluminio reciclado, en aguas contaminadas del centro poblado El Juncal

presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de

Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental _____;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE: JUAN MANUEL QUIZA GAFARO

Firma: JUAN M. QUIZA



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE FLUORUROS QUE POSEE LA ALÚMINA ACTIVADA SINTETIZADA A PARTIR DE MATERIAL DE ALUMINIO RECICLADO, EN AGUAS CONTAMINADAS DEL CENTRO POBLADO EL JUNCAL.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
QUIZA GÁFARO	JUAN MANUEL

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
CASTRO CAMACHO	JENNIFER KATIUSCA

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: MAGISTER EN INGENIERIA Y GESTION AMBIENTAL

FACULTAD: INGENIERIA

PROGRAMA O POSGRADO: MAESTRÍA EN INGENIERIA Y GESTION AMBIENTAL

CIUDAD: NEIVA **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2021 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 70

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 5

Diagramas_X_ Fotografías_X_ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___ Grabados___ Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros_X_

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Alúmina Activada</u>	<u>Activated alumina</u>	6. _____	_____
2. <u>Tratamiento aguas</u>	<u>Water treatment</u>	7. _____	_____
3. <u>Fluoruros</u>	<u>Fluorides</u>	8. _____	_____
4. <u>Tecnica en Continuo</u>	<u>Continuous technique</u>	9. _____	_____
5. _____	_____	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

El propósito de este trabajo de grado fue el de evaluar la capacidad de remoción de fluoruros que posee la alúmina activada sintetizada a partir de material de aluminio reciclable. Para ello, se obtuvo alúmina activada desde cero, utilizando latas de aluminio, las cuales se sometieron a un proceso álcali para su posterior transformación. Adicionalmente, se adquirió hidróxido de aluminio industrial importado, el cual se activó para luego comparar su accionar con la alúmina activada sintetizada.

Para llevar a cabo el diseño experimental, se elaboró un montaje en las instalaciones de la empresa QUINSA, que constó de una bomba dosificadora que se encargó de bombear la muestra problema desde el tanque alimentador, hacia la columna empacada con el material adsorbente. Dicha columna



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

3 de 5

fue armada con alúmina activada sintetizada a diferentes alturas (3cm, 5cm y 10cm) y con alúmina activada industrial con las mismas alturas. Una vez la solución atravesó por filtración la columna, se recolectaron diferentes muestras para desarrollar los análisis pertinentes, hasta encontrar el punto de ruptura ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) y saturación ($3,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) de cada experiencia.

Obtenidos los resultados y realizadas las comparaciones respectivas, se encontró que, para la alúmina activada sintetizada con alturas del lecho de 3, 5 y 10 centímetros, las capacidades de adsorción son: $0,123 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3\text{)}^{-1}\text{)}$, $0,172 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3\text{)}^{-1}\text{)}$ y $0,264 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3\text{)}^{-1}\text{)}$ en el punto de ruptura y $0,271 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3\text{)}^{-1}\text{)}$, $0,346 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3\text{)}^{-1}\text{)}$ y $0,397 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3\text{)}^{-1}\text{)}$ en el punto de saturación respectivamente.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The purpose of this degree work was to evaluate the fluoride removal capacity of activated alumina synthesized from recyclable aluminum material. For this, activated alumina was obtained from scratch, using aluminum cans, which were subjected to an alkali process for subsequent transformation. Additionally, imported industrial aluminum hydroxide was acquired, which was activated and then compared its action with the synthesized activated alumina.

To carry out the experimental design, an assembly was made at the QUINSA company facilities, which consisted of a dosing pump that was in charge of pumping the test sample from the feeder tank to the column packed with adsorbent material. Said column was armed with synthesized activated alumina at different heights (3cm, 5cm and 10cm) and with industrial activated alumina with the same heights. Once the solution filtered through the column, different samples were collected to develop the pertinent analyzes, until the breaking point ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and saturation ($3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) of each experiment were found.

Once the results were obtained and the respective comparisons were made, it was found that for the activated alumina synthesized with bed heights of 3, 5 and 10 centimeters, the adsorption capacities are: $0.123 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$, $0.172 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ and $0.264 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ at the break point and $0.271 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$, $0.346 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ and $0.397 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ at the saturation point respectively.



APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Néstor Enrique Cerquera Peña

Firma:

Nombre Jurado: Néstor Enrique Cerquera Peña

Firma:

Nombre Jurado: Luz Marina Botera Rojas

Firma:

—

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE FLUORUROS QUE POSEE LA ALÚMINA ACTIVADA SINTETIZADA A PARTIR DE MATERIAL DE ALUMINIO RECICLADO, EN AGUAS CONTAMINADAS DEL CENTRO POBLADO EL JUNCAL.

JUAN MANUEL QUIZA GAFARO

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL
NEIVA
2021

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE FLUORUROS QUE POSEE LA ALÚMINA ACTIVADA SINTETIZADA A PARTIR DE MATERIAL DE ALUMINIO RECICLADO, EN AGUAS CONTAMINADAS DEL CENTRO POBLADO EL JUNCAL.

JUAN MANUEL QUIZA GAFARO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de
Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental

Director(a)
JENNIFER KATIUSCA CASTRO CAMACHO MSc.
Ingeniera Agrícola

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL
NEIVA
2021

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Dedicatoria

Quiero dedicar este logro a Dios, a mi familia y amigos, en especial a mis papás que con su paciencia y respaldo esto fue posible.

Igualmente, a todas aquellas personas que intervinieron de una u otra forma en la ejecución de este proyecto.

ESTO ES PARA USTEDES

GRACIAS

Agradecimientos

Agradecimientos a la empresa Química Integrada QUINSA, por abrir sus puertas y permitir el uso de sus equipos e insumos de laboratorio durante la ejecución de este proyecto.

Al Ingeniero Químico Cesar Rojas por su total entrega antes durante y después del desarrollo de este trabajo de grado.

A Jaime Sanabria por su colaboración en la toma y recolección de muestras llevada a cabo en la planta modular del centro poblado El Juncal.

Y a todas aquellas personas que hicieron presente su colaboración.

Resumen

El propósito de este trabajo de grado fue el de evaluar la capacidad de remoción de fluoruros que posee la alúmina activada sintetizada a partir de material de aluminio reciclable. Para ello, se obtuvo alúmina activada desde cero, utilizando latas de aluminio, las cuales se sometieron a un proceso álcali para su posterior transformación. Adicionalmente, se adquirió hidróxido de aluminio industrial importado, el cual se activó para luego comparar su accionar con la alúmina activada sintetizada.

Para llevar a cabo el diseño experimental, se elaboró un montaje en las instalaciones de la empresa QUINSA, que constó de una bomba dosificadora que se encargó de bombear la muestra problema desde el tanque alimentador, hacia la columna empacada con el material adsorbente. Dicha columna fue armada con alúmina activada sintetizada a diferentes alturas (3cm, 5cm y 10cm) y con alúmina activada industrial con las mismas alturas. Una vez la solución atravesó por filtración la columna, se recolectaron diferentes muestras para desarrollar los análisis pertinentes, hasta encontrar el punto de ruptura ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) y saturación ($3,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) de cada experiencia.

Obtenidos los resultados y realizadas las comparaciones respectivas, se encontró que, para la alúmina activada sintetizada con alturas del lecho de 3, 5 y 10 centímetros, las capacidades de adsorción son: $0,123 \text{ (mg F}^{-*}(\text{g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$, $0,172 \text{ (mg F}^{-*}(\text{g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ y $0,264 \text{ (mg F}^{-*}(\text{g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ en el punto de ruptura y $0,271 \text{ (mg F}^{-*}(\text{g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$, $0,346 \text{ (mg F}^{-*}(\text{g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ y $0,397 \text{ (mg F}^{-*}(\text{g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ en el punto de saturación respectivamente. De igual manera, se observó un mejor desempeño de la alúmina activada industrial al momento de remover fluoruros de la muestra problema, con relación a la alúmina activada sintetizada.

Finalmente, con la divulgación de la investigación se espera, como primera medida, beneficiar a los pobladores del centro poblado El Juncal, en la problemática que aqueja la

salud de sus habitantes, debido a los altos índices de fluoruros en el agua potable. Y por último, concientizar a la comunidad en general en adoptar hábitos que fomenten un desarrollo sostenible, principalmente en la recolección y transformación de material aprovechable.

Palabras claves: Alúmina activada, tratamiento de aguas, fluoruros, técnica en continuo.

Abstract

The purpose of this degree work was to evaluate the fluoride removal capacity of activated alumina synthesized from recyclable aluminum material. For this, activated alumina was obtained from scratch, using aluminum cans, which were subjected to an alkali process for subsequent transformation. Additionally, imported industrial aluminum hydroxide was acquired, which was activated and then compared its action with the synthesized activated alumina.

To carry out the experimental design, an assembly was made at the QUINSA company facilities, which consisted of a dosing pump that was in charge of pumping the test sample from the feeder tank to the column packed with adsorbent material. Said column was armed with synthesized activated alumina at different heights (3cm, 5cm and 10cm) and with industrial activated alumina with the same heights. Once the solution filtered through the column, different samples were collected to develop the pertinent analyzes, until the breaking point ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and saturation ($3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) of each experiment were found.

Once the results were obtained and the respective comparisons were made, it was found that for the activated alumina synthesized with bed heights of 3, 5 and 10 centimeters, the adsorption capacities are: $0.123 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$, $0.172 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ and $0.264 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ at the break point and $0.271 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$, $0.346 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ and $0.397 \text{ (mg F}^{-} \cdot \text{(g Al}_2\text{O}_3)^{-1})$ at the saturation point respectively. Similarly, a better performance of industrial activated alumina was observed when removing fluorides from the test sample, in relation to synthesized activated alumina.

Finally, with the dissemination of the research, it is expected, as a first measure, to benefit the residents of the El Juncal town center, in the problem that affects the health of its inhabitants, due to the high levels of fluorides in drinking water. And finally, raise awareness in the

community in general in adopting habits that promote sustainable development, mainly in the collection and transformation of usable material.

Keywords: Activated alumina, water treatment, fluorides, continuous technique.

Tabla de Contenidos

Resumen.....	vi
Capítulo 1.....	1
Introducción	1
1. Planteamiento del Problema	3
2. Justificación	6
Aspecto Social	6
Aspecto Ambiental	6
Generación de Nuevo Conocimiento.....	7
3. Objetivos.....	8
Objetivo General.....	8
Objetivo Especifico	8
Capítulo 2.....	9
Marco Teórico	9
4. Antecedentes	9
5. Marco Conceptual	12
Capítulo 3.....	25
Metodología	25
6. Etapa Preliminar.....	25
7. Etapa de Ensayos.....	30
8. Etapa de Análisis y Resultados	31
9. Análisis Estadístico	34
Capítulo 4.....	35
Resultados y Análisis	35
Conclusiones	50
Recomendaciones.....	52
Referencias.....	54

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Características del agua.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2. Tamaño de partícula, área superficial y tiempo de sedimentación.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla3. Datos experimentales obtenidos con AA industrial h= 3cm y diferentes condiciones de operación.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 4.Datos experimentales obtenidos con AA industrial h= 5cm y diferentes condiciones de operación.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 5 Datos experimentales obtenidos con AA industrial h= 10cm y diferentes condiciones de operación.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 6. Datos experimentales obtenidos con AA sintetizada h= 3cm y diferentes condiciones de operación.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 7 Datos experimentales obtenidos con AA sintetizada h= 5cm y diferentes condiciones de operación.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 8 Datos experimentales obtenidos con AA sintetizada h= 10cm y diferentes condiciones de operación</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 9 Capacidad de adsorción de las alúminas en el punto de ruptura (q_r)</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 10 Capacidad de adsorción de las alúminas en el punto de Saturación (q_s).....</i>	<i>48</i>

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Sistema de acueducto centro poblado El Juncal</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Modelo de filtro</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3 Elaboración de Hidróxido de Aluminio a partir de latas de aluminio.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4 Calcinación Hidróxidos de Aluminio</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5. Metodología experimental para obtención de alúmina activada a partir de aluminio recuperado.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6 Montaje técnica en continuo con AA</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7. Esquema de instalación para adsorción de fluoruros con AA en continuo</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8 Fotómetro Nova 60</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9 Kit Merck determinación fluoruros</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
<i>Figura 10 Resultados sin fluoruros</i>	<i>30</i>
<i>Figura 11 Ligero aumento de fluoruros</i>	<i>32</i>
<i>Figura 12 Aumento considerable de fluoruros</i>	<i>31</i>
<i>Figura 13 alta presencia de fluoruros</i>	<i>32</i>
<i>Figura 14 Curva de ruptura mostrando el movimiento de la (MTZ)</i>	<i>34</i>
<i>Figura 15 Curvas de ruptura AA industrial h=3.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 16 Curvas de ruptura AA industrial h=5.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 17 Curvas de ruptura AA industrial h=10.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 18 Curvas de ruptura AA sintetizada h=3</i>	<i>41</i>
<i>Figura 19 Curvas de ruptura AA sintetizada h=5</i>	<i>43</i>
<i>Figura 20 Curvas de ruptura AA sintetizada h=10.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 21 Comparación rendimiento de AA Ind y AA Sint h= 3 cm.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 22 Comparación rendimiento de AA Ind y AA Sint h= 5 cm.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 23 Comparación rendimiento de AA Ind y AA Sint h= 10 cm.....</i>	<i>47</i>

Tabla de Ecuaciones

<i>(Ecuación 1)</i> -----	24
<i>(Ecuación 2)</i> -----	25
<i>(Ecuación 3)</i> -----	27
<i>(Ecuación 4)</i> -----	32

Capítulo 1

Introducción

La preservación del medio ambiente representa uno de los mayores desafíos para la humanidad, pues el apresurado desarrollo tecnológico en respuesta a las crecientes demandas y expectativas del hombre, junto al acelerado crecimiento de la población, producen una enorme presión sobre el ecosistema del planeta, que a su vez se traduce en niveles cada vez mayores de contaminación. Campos et al., (Como se citó en Hernández et al., 2013).

Por tal motivo, la generación de residuos sólidos está colmatando los principales rellenos sanitarios no solo de Colombia sino también de diferentes países y se está convirtiendo en un problema hacer disposición adecuada de este tipo de desechos. Ahora, si bien es cierto reciclar es una tendencia que ha cobrado fuerza en el siglo XXI, no es una solución definitiva a la problemática que aqueja a una sociedad de consumismo, donde la falta de cultura sumado al desinterés de los gobiernos por el desarrollo sostenible, tienen en jaque al medio ambiente.

Pero este problema de contaminación no termina aquí, pues uno de los elementos esenciales para el bienestar y calidad de vida de la humanidad se ve igualmente afectada. El agua. Por desgracia, así como se necesita este líquido vital para poder vivir, también se utiliza como vertedero de desperdicios de tipo sanitario, industrial, radioactivo etc. Estas descargas, son las principales responsables de la alteración de la calidad de las aguas naturales, ya sean superficiales o subterráneas, que en algunos casos llegan a estar tan contaminadas que su potabilización resulta muy difícil y costosa. (Quiza y Rojas, 2013). En el caso particular de las aguas subterráneas, sus condiciones están ligadas principalmente a la litología de los materiales geológicos que conforman el acuífero y a los procesos de oxidación-reducción que afectan a estos elementos; Uno de ellos y que se encuentra en grandes concentraciones en este tipo de aguas es el flúor, el cual puede ocasionar deformidades de los tejidos duros, como la fluorosis dental y esquelética, condición que es irreversible y aparece como resultado de la

ingesta excesiva de dicho elemento durante el periodo de la formación de los dientes, generalmente desde que se nace hasta que se cumplen 6-7 años, presentando una hipomineralización del esmalte dental por el aumento de la porosidad.

Los resultados del estudio Nacional de Salud Bucal, muestran que simultáneamente con la reducción del problema de caries, otro problema ha arrojado una frecuencia significativa, probablemente como una consecuencia adversa de la amplia utilización de fluoruros: la fluorosis dental. Según el último Estudio Nacional, la prevalencia Nacional de fluorosis dental en niños Colombianos es de 6 y 7 años, es de 25.7%. Por regiones, en Bogotá la prevalencia es de 22.9%, en la región central en las que están situadas las ciudades de Medellín y Manizales es del 25.3% y en la región Atlántica que incluye a Cartagena es de 19.9%. En Bogotá se tomó la mayor prevalencia de fluorosis moderada a severa con un 4.5% de niños afectados. (Gobernación del Huila, 2008, p.8)

De acuerdo a lo anterior y teniendo como base la necesidad de un desarrollo ambiental y socialmente sostenible, se realizó esta investigación, con el objeto de transformar material de aluminio reciclable en un compuesto activo para el tratamiento de aguas, que facilite y colabore en la remoción de elementos indeseados que afecten a las poblaciones que cuentan con sistemas de potabilización de bajo presupuesto, específicamente para la población del centro poblado El Juncal.

Para finalizar, este documento se estructuró en 4 capítulos. En el primer capítulo se presenta una revisión de los aspectos relacionados con la descripción del proyecto, donde fundamenta, justifica y plantea las necesidades de la elaboración del mismo; Un segundo capítulo donde hace referencia a todo lo relacionado con el estado del arte, marco legal y antecedentes que soportan y complementan lo elaborado en la investigación; Un tercer capítulo en el cual se explica detalladamente la metodología que se utilizó para obtener los resultados y un cuarto capítulo donde se analizaron los resultados y se elaboraron las conclusiones pertinentes a la producción científica asociada a la presente tesis de maestría.

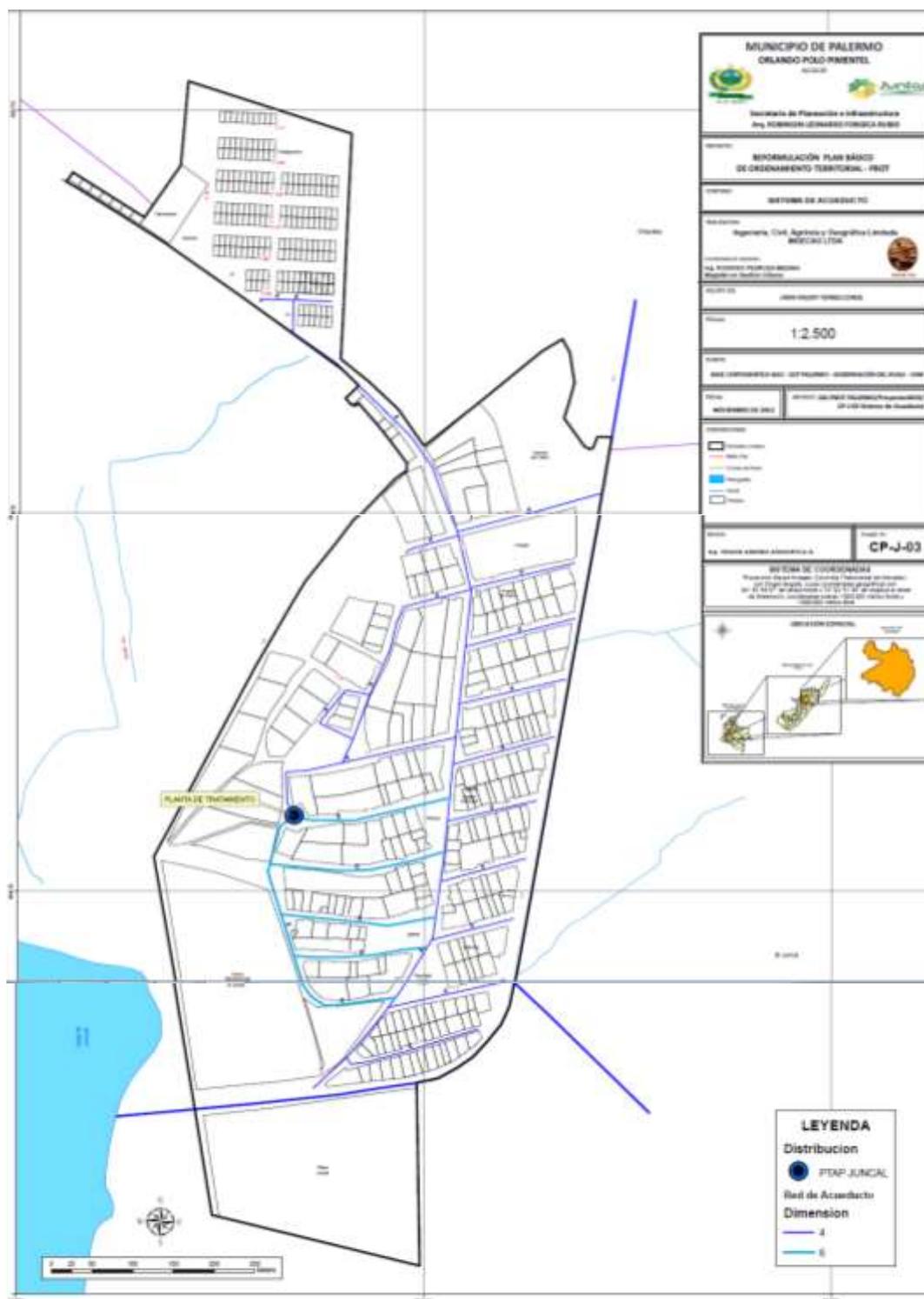
1. Planteamiento del Problema

Según Valenzuela, Ramírez, Sol y Reyes (2011) En el mundo por lo menos 25 países padecen fluorosis endémica. En la India 15 de los 32 estados se han identificado como endémicos para esta enfermedad, más de 6 millones de personas son seriamente afectadas por fluorosis y otras 62 millones están expuestas a ella y Colombia no es la excepción.

Un claro ejemplo de estas zonas de incidencia es el centro poblado El Juncal, ubicado en el municipio de Palermo departamento del Huila y zona de referencia donde se llevó a cabo la investigación (Figura 1). En este lugar, como explica Ramos (2017), se presentaron más de 200 casos de Fluorosis dental ya que el agua que se consume, es extraída de un aljibe que se encuentra a 200 metros de profundidad, es llevada a unos tanques por un sistema de bombeo donde se aplica un químico coagulante (sistema modular de tratamiento de agua) para posteriormente ser conducida a las residencias del centro poblado. Una vez allí, se encontraron valores de flúor de hasta $1,8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ teniendo en cuenta que el valor máximo permitido es de $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (resolución 2115, 2007).

Figura 1.

Sistema de acueducto centro poblado El Juncal



Nota: Tomado de Secretaria de Planeación e Infraestructura, 2012

Debido a este tipo de condiciones que alteran la salud de la población, se deben tomar

medidas para garantizar que la calidad de agua que llega a los hogares cumpla con lo establecido en la normatividad vigente de cada país; para el caso de Colombia, la resolución 2115 de 2007 es la que establece los límites máximos permitidos que deben obedecer las plantas de tratamiento de agua a lo largo y ancho del territorio. Por lo tanto, para dar cumplimiento a la política y eliminar las impurezas de los cuerpos de agua, se dispone de diferentes mecanismos y/o sustancias químicas, que, al contacto con el agua, generan precipitaciones de los elementos que alteran las condiciones fisicoquímicas. En algunos casos, los procedimientos convencionales no bastan para garantizar que los parámetros obedezcan a lo exigido por la norma, razón por la cual se busca la ayuda de diferentes elementos que complementen el accionar y así alcanzar las cifras óptimas de cada estándar de calidad. Por tal motivo se utilizó alúmina activada, ya que por excelencia este compuesto es uno de los elementos coadyuvantes con mayor eficacia al momento de remover fluoruros en el agua, así como otro tipo de elementos, por ejemplo, metales pesados. Su aplicación se puede efectuar de forma directa, agregando una dosis óptima al agua en la fase rápida para potencializar el arrastre de material indeseable en la etapa de sedimentación, o de forma indirecta mediante la implementación como lecho filtrante.

Al integrar los conceptos anteriormente mencionados se obtuvo la realización de este proyecto de investigación, donde se involucró: una problemática social, que está directamente relacionada con la afectación a la salud pública del centro poblado El Juncal como consecuencia de los altos índices de flúor en el agua potable, un aporte ambiental, mediante la elaboración de mecanismos de transformación y aprovechamiento de material reciclable en compuestos de aplicación para el tratamiento de aguas y la generación de nuevo conocimiento, al evaluar la capacidad de adsorción de fluoruros de la alúmina sintetizada a partir de material de aluminio reciclable. Por consiguiente, se planteó como referente de trabajo el interrogante:

¿Cuál es la capacidad de adsorción de fluoruros que posee la alúmina activada sintetizada en aguas contaminadas del centro poblado el Juncal, bajo condiciones de concentración de fluoruros constante, caudal constante y diferentes alturas del lecho filtrante?

2. Justificación

Era importante realizar este proyecto por considerar 3 aspectos fundamentales.

Aspecto Social:

Dentro del aspecto social se evidenció una problemática que lleva bastantes años en el centro poblado El Juncal, la cual hace referencia a la presencia de fluoruros en el agua potable y las consecuencias en materia de salud que ha generado. Algunos medios de comunicación locales han abordado esta lamentable situación de la siguiente manera.

Un problema de fluorosis se viene presentando en el corregimiento de El Juncal en Palermo, inconveniente que, de acuerdo con el secretario de Salud del Huila, es algo que no es solo de dicho centro poblado, también de buena parte de la zona rural opita.

“Es una revisión que hemos estado haciendo últimamente pero que es una problemática que llega de años atrás, las aguas veredales en una gran cantidad tienen flúor de manera incrementada, en su gran mayoría con niveles por encima de lo permitido”, expresó Carlos Daniel Mazabel, secretario de salud del Huila.

Según el titular de la cartera sanitaria, en el caso de El Juncal, se viene presentando desde 2002 y desde 2006 con niveles de flúor superior a los permitidos, siendo el escenario para la fluorosis.

En ese sentido Mazabel expresó que se hizo seguimiento del caso de una menor que fue diagnosticada y que incluso sus resultados fueron analizados en el exterior, donde se determinó que tenía fluorosis ósea.

La fluorosis es una patología que se presenta cuando el agua tiene altos niveles de flúor y se determina en los niveles leve, moderada, severa y grave; el caso de fluorosis ósea ocurre luego de una exposición de más de 10 años. (Puentes, 2015, p. 1)

Por lo anterior, se espera que con los resultados que se obtuvieron en esta investigación, se ofrezca una solución acertada a esta controversial situación que aqueja a los habitantes de la comunidad del centro poblado El Juncal.

Aspecto Ambiental

Actualmente, el mundo entero está pasando por momentos difíciles por cuenta de la contaminación, cambio climático, deforestación y efecto invernadero. Por tal motivo, se

deben tomar medidas que mitiguen en lo posible las devastadoras consecuencias que estos fenómenos generan. Para ello, es necesario concientizar a la humanidad de la importancia de un desarrollo ambientalmente sostenible, donde el uso de los recursos naturales se mantenga en equilibrio con la renovación de los mismos (en el caso de los recursos renovables), adoptar buenas prácticas ambientales como hábitos cotidianos en pro de reducir los impactos negativos que causan los procesos productivos. El departamento administrativo para la prosperidad social (2018) menciona algunas prácticas ambientalmente sostenibles que contribuyen a la protección del medio ambiente y propone algunas pautas de comportamiento en relación con los impactos ambientales significativos que han sido identificados en la Matriz de Aspectos e Impactos Ambientales.

- ✓ Uso eficiente de energía eléctrica
- ✓ Uso eficiente de material de oficina
- ✓ Gestión de residuos
- ✓ Reducir, reutilizar reciclar.

En este orden de ideas, el aprovechamiento del material de aluminio reciclable (en este caso particular las latas) y su posterior transformación en productos de tratamientos de agua, ayuda “reducir el impacto ambiental y económico que se genera al producir aluminio primario a partir de la bauxita y aumentar la producción con aluminio reciclado que solo genera un 15% de las emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del cambio climático” (Fernández, 2009, p.1).

Generación de Nuevo Conocimiento

Por último, pero no menos importante se tiene la generación de nuevo conocimiento. Este aspecto fue fundamental para cumplir con el objetivo de esta investigación, ya que a medida que se profundizó en el marco contextual y los antecedentes para fundamentar el proyecto, se encontró muy pocas referencias vinculadas a esta experiencia y prácticamente inexistentes

con lo relacionado a la capacidad de remoción de fluoruros de una AA sintetizada a partir de material de aluminio aprovechable. Por lo anterior se espera que con los resultados que se obtuvieron en esta experiencia se generen nuevas tendencias, donde se involucre el aprovechamiento del material de aluminio reciclable, en los procesos de tratamiento de aguas.

3. Objetivos

Objetivo General

Determinar, la capacidad de adsorción de fluoruros que posee la alúmina activada (AA) sintetizada a partir de material de aluminio reciclado, en aguas contaminadas del centro poblado El Juncal.

Objetivo Especifico

Obtener, por medio álcali, Alúmina Activada (AA) utilizando latas desechables de aluminio como materia prima.

Cuantificar bajo condiciones de concentración de fluoruros constante, caudal constante y diferentes alturas del lecho filtrante, el comportamiento de las tasas de remoción de fluoruros que presentan las AA

Determinar la capacidad de adsorción de fluoruros que posee la alúmina activada (AA) sintetizada a partir de material de aluminio reciclable y contrastarlos con los valores obtenidos con la alúmina activada de tipo industrial.

Capítulo 2

Marco Teórico

Se presentan los antecedentes y el marco conceptual, apartados que contienen una revisión literaria de proyectos nacionales e internacionales relacionados con el tema de investigación y los conceptos necesarios requeridos que fundamentaron e hicieron posible llevar a cabo esta experiencia.

4. Antecedentes

A continuación, se exponen algunas experiencias representativas y relacionadas con la investigación sobre la capacidad de remoción de fluoruros que posee la alúmina activada (AA).

En España, se desarrolló un estudio del proceso de eliminación de fluoruro por adsorción con Alúmina activada de grado analítico (Salazar, 2016) en el cual, se llevó a cabo dos tipos de experimentos. Un primer experimento en discontinuo, utilizando un floctester, permitiendo controlar las condiciones de agitación, mientras la alúmina se utiliza como agente coadyuvante en la remoción de fluoruros y una segunda experiencia en continuo, en donde se hace pasar agua contaminada con concentraciones de fluoruro conocidas, a través de una columna de relleno con alúmina activada a caudal constante, siendo meticulosos en la toma de muestras en periodos de tiempo establecidos, con el fin de encontrar el punto de ruptura y el punto de saturación del compuesto adsorbente. Al final, la autora llega a la conclusión que la alúmina activada tiene una capacidad de remoción de fluoruros que sobrepasa el 80%.

En Argentina, Aliota *et al.*, (2008) elaboraron un estudio comparativo entre diferentes métodos de remoción de flúor en aguas de carácter subterráneo, con el fin de determinar el proceso fisicoquímico adecuado para obtener agua potabilizada dentro de los parámetros

determinados por el C.A.A. (Código Alimentario Argentino) a fin de que su ingesta no afecte la salud de sus consumidores. Entre los métodos seleccionados se encuentran ablandamiento con cal, coagulación con sulfato de aluminio y otros coagulantes, filtración con alúmina activada, filtración con resinas de intercambio iónico, ósmosis inversa y filtración con hueso molido. Si bien es cierto los autores concluyeron que una combinación de métodos entre resinas de intercambio iónico y ósmosis inversa era lo más adecuado para la remoción de flúor y otros elementos indeseables en el agua, la alúmina activada arrojó datos conformes donde se demuestra que es altamente selectiva y eficaz al momento de remover fluoruro y arsénico en cuerpos de agua contaminados. Otros estudios comparativos entre adsorbentes se realizaron en otros países y con otros compuestos. Por ejemplo, en México, Teutli (2014) lleva a cabo un estudio integral de materiales útiles en la remoción de iones fluoruro de agua para uso y consumo humano. En este proceso, se desarrolló un sistema para la remoción de estos iones, mediante un análisis comparativo de hematita, zeolita y calcita como adsorbentes, haciendo modificaciones a cada compuesto por medio electroquímico con aluminio y lantano. Una vez finalizada la práctica, la autora concluye que la presencia de lantano en hematita y el material zeolítico mejoran su eficiencia desorción para iones fluoruro, y los materiales modificados con aluminio muestran capacidades desorción más altas que los materiales modificados con lantano. Otro estudio comparativo realizado igualmente en México, pero esta vez expuesto en el congreso internacional conjunto Cancún por Flores y Lopez (2004), muestra la interacción del flúor, con una arcilla natural mexicana llamada kaolinita y una apatita sintética llamada hidroxiapatita. En este trabajo se estudia la retención del flúor en ambos minerales demostrando que la hidroxiapatita (fosfato de calcio) retiene en mayor proporción al flúor que la kaolinita (aluminosilicato), todo esto a valores de pH ácidos, disminuyendo a medida que aumenta el valor del pH.

Por otro lado, en Irán, Aghapour, Khorsandi, Dehghani y Karimzade (2017) llevaron a cabo un experimento en el que se elabora alúmina activada (AA) a partir de lodos de alumbre reciclados de las plantas de tratamientos de agua, con el objeto de remover fluoruros de soluciones acuosas por adsorción. Con base en su experiencia, los autores concluyeron que la eficacia máxima de la adsorción de flúor fue del 96% en condiciones óptimas. Adicional a esto, resaltan la importancia de reciclar sustancias nocivas para el medio ambiente, como lo son los lodos generados del tratamiento de aguas, para convertirlos en material aprovechable.

En México, Valenzuela *et al.* (2011) buscaron la forma de eliminar a nivel doméstico el flúor en el agua para consumo humano. Para ello, evaluaron óxido de magnesio, alúmina activada (AA), hueso granular y calcinado como métodos de eliminación de fluoruros en aguas con concentraciones de hasta 9.0 mg/L. Una vez llevada a cabo la experiencia y teniendo en cuenta parámetros como tiempo de contacto de cada elemento en agitación y pH, concluyeron que la AA alcanza a remover el 42% de fluoruros presentes en 10 min de contacto, mientras que el hueso calcinado remueve el 43 % de fluoruros en 5 minutos de contacto. De igual manera indican que el proceso con AA es más lento y se hace dispendioso al realizar variaciones en el pH para que incremente la cantidad de fluoruro removido. Por otro lado, existe la posibilidad de que aumente la concentración de aluminio disuelto en la solución resultante.

Por último, en India Ghorai y Pant (2004), llevaron a cabo una investigación cuyo objetivo fue eliminar el fluoruro por medio de AA, utilizando una columna de 550 mm de longitud y 50.8 mm de diámetro interno, teniendo como parámetros de evaluación la velocidad del flujo de entrada del agua con concentraciones de flúor conocidas y el pH de la solución. Concluida la práctica, los investigadores encontraron que la adsorción máxima tuvo lugar a pH7 y que el aumento de la velocidad del flujo de entrada con altas concentración de

flúor conlleva a una saturación temprana de la AA lo cual indica una menor eliminación del material contaminante.

Es importante resaltar que, en Colombia, de acuerdo a la revisión de infografía y bibliografía que se llevó a cabo por el investigador, no se han desarrollado experiencias relacionadas con la remoción de fluoruros en cuerpos de agua mediante AA a partir de material de aluminio aprovechable o por lo menos no se encuentran documentadas. La información existente está relacionada con la amenaza y el riesgo que presenta el flúor en la salud pública y las alteraciones que el consumo excesivo puede ocasionar.

5. Marco Conceptual

Al momento de abordar el tema de investigación, fue necesario profundizar en ciertos conceptos que están intrínsecamente relacionados y que son de suma importancia, facilitando así la fluidez en el desarrollo de la experiencia. Algunos ejemplos son: El agua, su importancia, tratamientos de agua, alúmina activada, reciclaje, entre otros, y se presentan a continuación.

En la última década, distintas entidades de todo el mundo reconocen cada vez más la necesidad de actuar responsablemente con respecto al medio ambiente, especialmente con el agua. Este nuevo clima internacional responde a las nuevas formas de presión y de interacción entre los actores sociales más importantes: empresas transnacionales, conglomerados económicos nacionales, bancos, compañías de seguros, organizaciones internacionales políticas y financieras, consumidores, ciudadanos y los gobiernos de los países. El desarrollo de estas relaciones en torno al concepto de desarrollo sostenible, contribuye a la estructuración de una nueva forma de gobierno en múltiples ámbitos públicos y privados, tanto a escala nacional como internacional. (Rey, 2006, p. 82)

Una vez que se toma conciencia de la problemática ambiental asociada al uso del agua, se hace preciso involucrar a todos los entes implicados en la malversación del recurso, con el fin de que adopten un comportamiento ambientalmente sostenible y empiecen a generar acciones en pro de la conservación del líquido, ya que según Erazo (2011), de las tres cuartas partes de agua de las que está cubierto el planeta tierra, tan solo el 2.5% del total corresponde a agua dulce que sirve para consumo, algo insignificante teniendo en cuenta que “la población

mundial supera las 7.700 millones de personas en la actualidad” (Naciones Unidas, 2019). De este 2.5% de agua dulce, el agua subterránea representa una fracción importante en cada uno de los continentes; “Éstas están almacenadas en acuíferos, ubicados a diferentes niveles de profundidad, hasta sistemas confinados que están a varios kilómetros por debajo de la superficie” (Foro Peruano para el agua, 2011, p.7). Su formación se da principalmente gracias a la filtración que tiene lugar en los materiales porosos saturados del subsuelo y sus características fisicoquímicas están establecidas principalmente por la litología de los materiales geológicos que conforman el acuífero y a los procesos de oxidación-reducción que afectan a estos elementos. Otros factores influyentes en dichas características son el vertimiento de sustancias contaminantes, los cambios en el uso del suelo tales como la deforestación, las prácticas agrícolas inadecuadas, el incremento de urbanizaciones en zonas de producción hídrica, entre otros.

La tabla 1, características del agua, contiene algunos de los parámetros que se deben tener en cuenta al momento de identificar la calidad de un cuerpo de agua.

Tabla 1.

Características del agua

Físicas	Turbiedad, Color, Olor, Sabor, Temperatura, Sólidos suspendidos, Conductividad
Químicas	pH, Dureza, Acidez/ alcalinidad, Fosfatos, sulfatos, Fe, Mn, Cloruros, Oxígeno disuelto, Grasas y/o aceites, Amoníaco, Hg. Ag. Pb. Zn. Cr. Cu. B.Cd. Ba. As. Al. F Nitratos, Pesticidas, etc

Nota. Tomado de Murillo, 2011

Turbiedad: Los altos valores de turbidez en una muestra de agua se toman como signo de contaminación cuando se habla de agua apta para el consumo humano. De acuerdo con el manual de análisis de agua de Hach (2000) “La turbidez está causada por sólidos suspendidos incluyendo limo, arcilla, algas y demás pláctones, microbios, materia orgánica y otras partículas delgadas insolubles en los medios de muestra”. Su unidad de medida son los UNT y su valor máximo permitido es de 2 unidades.

Color: Generalmente se observa el agua cristalina y se especula que es incolora, pero en ella se encuentran en suspensión elementos no naturales producto de la contaminación causada por vertimientos, material orgánico en descomposición etc. Su unidad de medida según el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (2013) es el color producido por un $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de platino, en la forma de ion cloroplatinato; y se denominan unidades de color en la escala Platino-Cobalto (UC Pt-Co).

Sólidos suspendidos: Pérez (2010) define este apartado como la cantidad de materia por unidad de volumen que es retenida al filtrar la muestra de agua en un filtro de tamaño nominal, de poro de $2 \mu\text{m}$ o menor.

pH: El pH o potencial de hidrógeno, es la medida de la concentración de iones Hidrogeno. “Se define como el logaritmo del inverso de la concentración molar de iones H^+ . $\text{pH} = \text{Log } 1/[\text{H}^+]$. Su interpretación va relacionada con la Alcalinidad o Acidez titulable, los cuales tiene relevancia por encima de 9,6 o por debajo de 4,4 respectivamente” (Mayorca y Quesada, 2012, p. 45).

Aluminio: El aluminio es uno de los metales más abundantes sobre la corteza terrestre. En la actualidad, tiene una amplia aplicación en diferentes sectores de la industria como farmacéutica, alimenticia, construcción, tratamiento de aguas etc. En este último, las sales de aluminio se usan como coagulantes para reducir la materia orgánica, el color, la turbiedad y

los niveles de microorganismos. Es posible que su empleo repercuta en el aumento de las concentraciones de aluminio residual en el agua potable y ocasionen efectos neurotóxicos en la salud (Silva *et al.*, 2015).

Flúor: El flúor, es un elemento químico de símbolo F, número atómico 9 y masa atómica 18.99, pertenece a la familia de los halógenos y es el más reactivo, tanto, que reacciona con facilidad, a temperatura ambiente, con muchas otras sustancias elementales, entre ellas el azufre, yodo, fósforo, bromo y la mayor parte de los metales. Los compuestos de flúor tienen muchas aplicaciones que van desde los clorofluorocarbonos, que se usan como agente dispersante en los vaporizadores en aerosol y como refrigerante, hasta la implementación en productos dentales. Sin embargo, la exposición a concentraciones más altas a través del agua para consumo, puede ocasionar deformidades de los tejidos duros, como la fluorosis dental y esquelética. Este tipo de condición es irreversible y aparece como resultado de la ingesta excesiva de flúor durante el periodo de la formación de los dientes, generalmente desde que se nace hasta que se cumplen 6-7 años, presentando una hipomineralización del esmalte dental por el aumento de la porosidad.

La revista semana (2019) publicó un artículo realizado en la Universidad York de Canadá, en donde se vincula al flúor presente en el agua del grifo con la disminución del coeficiente intelectual de los bebés. De acuerdo a los resultados arrojados, al medir la ingesta diaria de flúor de la madre en lugar del fluoruro en su orina, los investigadores encontraron que un aumento de 1 miligramo en la ingesta de flúor se asoció con una caída de 3,7 puntos del CI (Coeficiente Intelectual) tanto en niños como en niñas.

De igual manera Lubkowska (2002) indicó que los complejos fluoruro-aluminados, que se generan de manera espontánea en soluciones acuosas que contienen trazas de fluoruros y iones aluminio, pueden actuar como signo inicial de la estimulación de la homeostasis,

degeneración y muerte de células. A largo tiempo el complejo puede representar un serio y poderoso factor de riesgo para el desarrollo del Alzheimer

En ese orden de ideas, ha sido necesario desarrollar técnicas, procedimientos o compuestos que se emplean sobre el agua cruda con el fin de remover o reducir los elevados índices de contaminación a los que son sometidos los cuerpos de agua de tal manera que sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas cumplan las especificaciones contenidas en las normas que regulan la materia (cogollo, 2010), con el fin de garantizar su potabilización y dar seguridad al consumidor final.

Algunos procesos o compuestos utilizados para descontaminar y potabilizar el preciado líquido son:

Filtración por Adsorción: “Proceso físico por el cual un compuesto en fase líquida o gaseosa entra en contacto con un sólido adsorbente y se adhiere a la superficie del mismo, mediante una fuerza denominada *fuerza de dispersión de London*” (Carbotécnia, 2020, p. 1).

En otras palabras, la adsorción es un proceso fisicoquímico de gran importancia debido a sus múltiples aplicaciones en la industria química y en el trabajo de laboratorio.

Se caracteriza por ser un proceso de separación y concentración de uno o más componentes basándose en la capacidad de ciertas sustancias sólidas de retener componentes, las más usuales son iones o moléculas de disoluciones puestas en contacto con dichos sólidos. Dentro de la adsorción hay dos mecanismos claramente diferenciados:

Adsorción química: la cual se da cuando las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie del sólido, lo que implica un enlace químico que es prácticamente irreversible. Salvando excepciones muy concretas y especializadas, la recuperación de una sustancia a través de este tipo de adsorción no es posible.

Adsorción física: Si el componente que se adsorbe y el sólido interactúan por medio de fuerzas de Van der Waals, se dice que la adsorción es física. Ya que como consecuencia de esta interacción se establecen enlaces débiles entre ambos componentes. La energía de enlace es similar a la energía de atracción entre las moléculas de un líquido.

El proceso de la adsorción sucede en tres pasos: macrotransporte, microtransporte y la propia adsorción. En el macrotransporte se produce el movimiento por convección y

difusión de los solutos a través de la fase líquida hasta alcanzar la interfase sólido-líquido. Mientras que en el microtransporte se produce la difusión a través del sistema de macroporos del adsorbente hasta llegar a las zonas de adsorción que se hallan en los microporos. De este modo, la adsorción tiene lugar en la superficie del adsorbente. (Hernández, 2016, p. 30-31)

Electrocoagulación: Acosta, Coy, Bourdon y Cuervo (2013) definen la electrocoagulación como

Un proceso que emplea los fundamentos de la electroquímica, la coagulación y flotación o precipitación, para eliminar los contaminantes del agua con el uso de electrodos (cátodos y ánodos), que por acción de un potencial de energía generan un coagulante, el cual lleva a la coagulación in situ. Este proceso ha demostrado tener alta eficiencia en la remoción de metales pesados, minimizando la generación de residuos secundarios y por ende el impacto ambiental del proceso. (p 308-309)

Osmosis Inversa (OI):

La OI puede describirse como un proceso de difusión controlada en que la transferencia de masa de iones a través de la membrana está controlada por difusión. Consecuentemente, este proceso puede llevar a la remoción de sales, durezas, patógenos, turbidez, desinfección de subproductos precursores (SPP), compuestos orgánicos sintéticos (COS), pesticidas y la mayoría de los contaminantes del agua residual conocidos hoy día. (Mora, Járay, Batay y Bekassy, 2004, p.84)

Precipitación Química: Otro de los métodos y quizás el más empleado es la precipitación química. Mediante este procedimiento, se busca clarificar, desinfectar y acondicionar química y organolépticamente el agua para garantizar su consumo. Está compuesto de 5 etapas. Coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

➤ **Coagulación:** una vez captada el agua y llevada a la planta de tratamiento, la coagulación es el primer paso que se lleva a cabo. Este consiste en desestabilizar las partículas contaminantes no sedimentables, por medio de agentes químicos denominados coagulantes. Vázquez (1994) menciona en su trabajo 5 pasos que componen esta primera etapa: Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existentes en la suspensión; Precipitación y formación de compuestos que se polimerizan; Adsorción de las

cadena polimérica en la superficie de los coloides; Adsorción mutua entre coloides y acción de barrido y precipitación. En pocas palabras lo que se busca es desestabilizar los sólidos coloidales contaminantes para aglomerarlos en partículas de mayor tamaño y peso, de tal forma que la precipitación sedé con mayor facilidad, ya que, de lo contrario, el tiempo de precipitación de este tipo de partículas tardaría demasiado tiempo. Así lo plantea Londoño (2012), quien estima los tiempos de sedimentación para este tipo de partículas, condensados en la tabla 2, tamaño de partículas, área superficial y tiempo de sedimentación.

Tabla 2.

Tamaño de partícula, área superficial y tiempo de sedimentación.

Diámetro de partícula mm.	Escala de tamaño.	Área superficial.	Tiempo de sedimentación.
10	Grava	3,15 Cm ²	0,3 s
1	Arena Fina	31,50Cm ²	3 s
0,1	Arena Gruesa	315,00Cm ²	38 s
0,01	Sedimento	3150,00 Cm ²	33 min
0,001	Bacteria	3,15 m ²	55 h
0,0001	Partícula Coloidal	31,50 m ²	230 días
0,00001	Partícula Coloidal	0,83 Ha	6,3 años
0,000001	Partícula Coloidal	2,83Ha	63 años

Nota. Tomado de Londoño, 2012

➤ Floculación: Terminado el proceso de coagulación y casi que, de manera simultánea, comienza la floculación, la cual consiste en aglomerar las partículas que fueron desestabilizadas por el agente coagulante, de tal manera que se pueda generar una partícula

de mayor tamaño y peso, denominada flóc o flóculo, facilitando así su precipitación por arrastre simple.

En esta etapa, en comparación de la coagulación, para producir la adherencia entre microflóculos, se necesita que el movimiento del agua sea lento y que dichas partículas, tengan un buen grado de desestabilización, esto con el fin de que los flóculos formados sean estables de tal manera que no se dispersen por el cuerpo de agua influyendo en la calidad de la misma.

➤ Sedimentación: La sedimentación es la etapa que antecede a la filtración y consiste en hacer precipitar el flóc formado por acción de la gravedad. Cuanto mejor sea la sedimentación, más eficiente será la filtración. En consecuencia, para tener una decantación perfecta, se deben tomar las siguientes precauciones: “correcta aplicación de coagulantes al pH óptimo (incluye la aplicación de alcalinizante, en caso de que sea necesario); mezcla rápida eficaz; mezcla lenta suficiente para producir buenos flóculos, grandes y pesados y limpieza rutinaria de los decantadores” (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2002, p. 445).

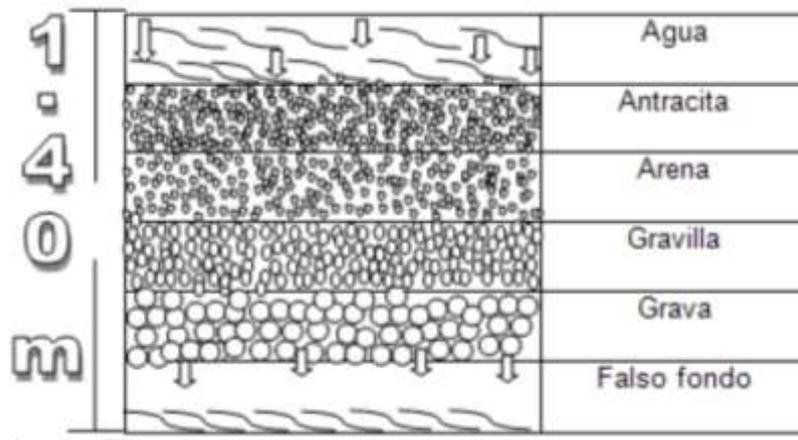
➤ Filtración: una vez sedimentado el material particulado contaminante, el agua atraviesa diferentes capas de lechos filtrantes para remover el remanente que aún se conserva.

Esta etapa de filtración, es inspirada en el proceso natural que se lleva a cabo en la naturaleza, donde el agua atraviesa diferentes mantos del subsuelo hasta llegar a los acuíferos. A medida que va profundizando en la tierra, los materiales porosos favorecen la remoción de materiales en suspensión y sustancias coloidales; así como la reducción de las bacterias presentes y la alteración de las características del agua, inclusive de sus características químicas.

Generalmente los filtros presentes en las plantas de tratamiento contienen antracita, arena, gravilla, grava y un falso fondo que se encarga de recolectar el agua filtrada y llevarlo a la siguiente etapa del proceso, como lo muestra la figura 2, modelo de filtro.

Figura 2.

Modelo de filtro



Nota. Tomado de Quiza y Rojas, 2013

➤ **Desinfección:** una vez finalizado el proceso de clarificación del agua, el cual se encarga básicamente de remover impurezas y material particulado contaminante, se procede a eliminar las bacterias presentes. Para ello, según lo plantea servicios de aguas de misiones (2008)

La inyección de cloro permite destruir los últimos microorganismos que aún podrían encontrarse presentes en el agua. Con este proceso se consigue desinfectarla, prevenir contaminación en las redes de distribución y además servir como indicador de calidad. En efecto, este proceso final de desinfección del agua permite asegurar su calidad sanitaria (p 9).

Alúmina Activada (AA): Aguilera, Ortiz y Sánchez (2013) definen la alúmina activada (AA) como un compuesto manufacturado a partir de hidróxido de aluminio mediante dehidroxilación para producir alto nivel de porosidad, que se obtiene calentando los hidratos

a temperatura superficie para expulsar la mayor parte del agua combinada. La AA se puede obtener de dos maneras. La primera por proceso Bayer, el cual es un proceso de purificación de la bauxita para obtener alúmina pura. Para ello, es necesaria la explotación de minas o yacimientos de bauxita, material que posteriormente es trasladado hasta un molino, donde es reducido a partículas de fácil tratamiento. Como la bauxita está compuesta en su mayor medida por óxido de aluminio e impurezas, debe ser atacada por una solución de sosa en combinación con altas temperaturas, con el fin de que dichas impurezas precipiten y así dejar el óxido de aluminio en solución como ión aluminato. Posteriormente, se lleva a cabo una filtración para separar totalmente los sólidos de la solución, para luego ser sometida a un proceso de cristalización mediante acidificación para así obtener hidróxido de aluminio, el cual es introducido a un horno rotatorio que deseca el material para finalmente adquirir la AA. (Davis, 2018). La segunda es por aprovechamiento del material de aluminio, haciendo uso de las 3 Rs, las cuales son definidas por el departamento para la prosperidad social (2018) de la siguiente manera.

Reducir: Se refiere a cambiar hábitos de consumo, es decir, comprar sólo lo esencial pues el sobrante se tira a la basura. Reducir es el paso más importante, pues disminuye el consumo excesivo de productos.

Reutilizar: Se refiere a darle un segundo uso a residuos que normalmente terminan en la basura, con el fin de dar una utilidad diferente y apropiada para la adquisición. Lo importante es darle un nuevo uso a aquello que ya ha tenido un costo económico y ambiental.

Reciclar: Este último paso, muchos de los materiales de los que están hechos los productos y sus correspondientes empaques o envases, tienen la posibilidad de incorporarse a otro ciclo de transformación. Esto es posible siempre y cuando los desechos se separen adecuadamente para maximizar los ciclos de transformación de cada material (p.9)

Teniendo en cuenta lo anterior, el material de aluminio se recolecta y se somete a un proceso de transformación con la ayuda de ácidos o bases fuertes, replicando el proceso Bayer solo que esta vez en lugar de bauxita se utiliza material reciclable y se cambia el enfoque del recurso hacia otras actividades.

La AA posee una alta capacidad para remover la humedad y cuenta con buenas propiedades de adsorción en el agua de elementos como arsénico, flúor, entre otros, de tal manera que puede ser utilizada por medio de aplicación directa como agente complementario del químico coagulante en la formación y precipitación de impurezas o también puede ser utilizada en lechos filtrantes como material adsorbente de elementos químicos indeseables presentes en los cuerpos de agua (Técnica en continuo).

Una vez el líquido ha sido sometido a un dispendioso proceso de clarificación y desinfección, se precisa constatar que la calidad del producto es la establecida por la norma. Para ello, se toman muestras que son llevadas al laboratorio para analizar las cualidades físicas, químicas y microbiológicas que determinan si el procedimiento o las dosis utilizadas son acertados o si por el contrario es necesario realizar ajustes. Entre los parámetros analizados en un laboratorio de aguas están los mencionados en la tabla 1 por referir algunos. Para esta investigación se utilizaron 2: Test en cubetas para la determinación de fluoruros y análisis de materia prima bauxita y óxido de aluminio y se describen a continuación.

Test de fluoruros en cubetas: Para la determinación de fluoruros se utilizaron varios kits de Merck, los cuales en solución débilmente ácida amortiguada forman, con alizarincomplexona y lantano (III), un complejo violeta que identifica los iones fluoruro para posteriormente determinar su cantidad fotométricamente. (Merck, 2016).

Cada kit contiene un frasco de reactivo F-1K y una cantidad de 25 cubetas de reacción, para un intervalo de medida en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de F^- de 0,025 a 1,80. Para concentraciones superiores a las especificadas con antelación, es necesario realizar diluciones en el orden de 1:2 o 1:10, de tal forma minimizar inconvenientes con relación al intervalo de lectura, caso que se presentó reiteradamente a lo largo de los ensayos ya que en ocasiones superaban el valor máximo permitido.

La preparación consiste en tomar una cubeta de reacción y adicionarle 5.0 mL de muestra con una pipeta preferiblemente aforada; posteriormente adicionar una microcucharada rasa de reactivo F-1K y agitar vigorosamente hasta que el reactivo se haya disuelto completamente; luego se deja reposar durante 15 minutos (tiempo de reacción) se agita nuevamente la cubeta y se mide la muestra en el fotómetro.

Para la toma de lecturas de las muestras en esta investigación, se utilizó el espectrofotómetro spectroquant nova 60, el cual reconoce y selecciona automáticamente el intervalo de medida y la longitud de onda correctos de acuerdo al código de barra que cada kit contiene (Supelco, 2019). Una vez el equipo reconoce el método, hace pasar un rayo de luz que atraviesa la cubeta que contiene la solución coloreada y que pierde intensidad de acuerdo a la concentración de analito que contiene la muestra, obteniendo la absorbancia y arrojando automáticamente (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ F para el caso de la investigación) el resultado de forma deseada en el display.

Análisis de Materia Prima y Oxido de Aluminio: para la determinación del contenido de Al_2O_3 se utilizó el procedimiento ITC-001 de 2017 del reglamento interno de la empresa química integrada Quinsa, el cual está basado en la NTC 531 6^a actualización de ICONTEC. Allí está consignado que para la determinación de Al_2O_3 en una muestra de hidróxido de aluminio, se debe secar el material a 160 °C por tiempo máximo de 1 hora, posteriormente se toma 3 gramos del material, se macera y en un beaker se agregan 100 mL de H_2SO_4 1:1 a agitación constante y temperatura como catalizador. Terminada la reacción, se deja enfriar y se adiciona 300 mL de agua destilada caliente. Se filtra la solución mediante papel filtro cualitativo y el líquido filtrado se transfiere a un balón de 1000 mL y se completa a volumen con agua destilada. Luego se toma una alícuota de 25 mL y se agrega a un erlenmeyer de 250 mL, se adiciona 25 mL de EDTA 0,05M y 15 mL de solución reguladora de acetato de

amonio. Se calienta el contenido a ebullición para posteriormente dejarlo enfriar. Luego se adiciona 3 o 4 gotas de indicador naranja de xilenol para posteriormente titular a exceso de EDTA con la solución estándar de 0,05M de sulfato de zinc con una bureta, hasta que el color cambie de amarillo a rojo violeta.

Finalizada la experiencia se introducen los valores en la ecuación (1), para obtener el valor en porcentaje de Al_2O_3 , compuesto activo que permite la adsorción de fluoruros.

$$\%Al_2O_3 = \frac{[(mL\ EDTA) - (mL\ ZnSO_4)F] \times 5,098 \times 0,05M}{\text{Gramos muestra titulada} \times 0.025} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Nota. Tomado de procedimiento ITC-001, para la determinación de oxido de aluminio, Quinsa, 2017

Capítulo 3

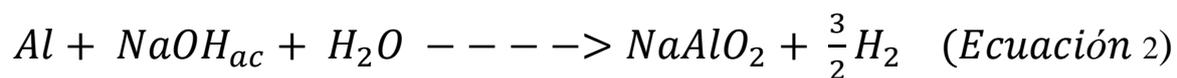
Metodología

La metodología que se empleó para la ejecución del estudio fue de carácter experimental y se estimó en 4 etapas. Preliminar, ensayos, resultados-análisis y análisis estadístico.

6. Etapa Preliminar.

En esta etapa lo que se buscó fue preparar detalladamente cada material y procedimiento para llevar a cabo las prácticas experimentales.

- **Determinación Muestra Problema:** Se realizaron tomas de muestras de agua cruda proveniente del pozo que abastece al centro poblado El Juncal, se determinó un valor promedio representativo de concentración de fluoruros el cual fue simulado en condiciones de laboratorio con agua destilada y fluoruro de sodio (NaF) y se estableció como muestra problema. El valor promedio de la muestra problema fue de $3.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de fluoruros
- **Obtención de alúminas activadas (AA):** Para elaborar la AA sintetizada a partir de material de aluminio reciclable (Figura 3, Elaboración de Hidróxido de Aluminio a partir de latas de aluminio), se recolectaron latas de aluminio, las cuales se utilizaron como precursor para la síntesis de hidróxido de aluminio mediante proceso álcali dada en la ecuación 2.



Nota. Tomado de Villavicencio, 2016

Figura 3

Elaboración de Hidróxido de Aluminio a partir de latas de aluminio.



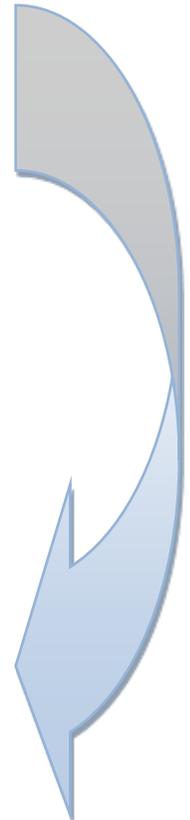
Se adicionó poco a poco las latas picadas al NaOH



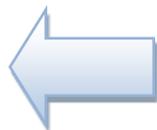
Durante la reacción, se agitó constantemente y se mantuvo la temperatura por encima de 100 °C. Cuando presentaba sequedad se adicionó agua



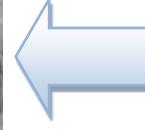
La reacción ha finalizado cuando la temperatura baja y no se observan burbujas ni restos de latas



Adquirido el Aluminato de sodio, se adicionó HCl para disminuir el pH y generar Hidróxido de Aluminio (Ecuación 3)

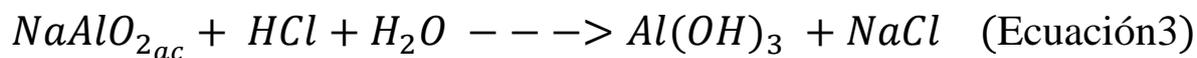


Una vez filtrado, el residuo sólido se desechó y la fase líquida se preparó para reaccionar con HCl



A continuación se procedió a filtrar la disolución mediante un embudo de Buchner y una bomba para generar vacío.

Es necesario tener en cuenta, que se debe tomar constantemente el pH durante la adición de Ácido clorhídrico (HCl) al aluminato de sodio, y cuando el valor sea de 8 aproximadamente, suspender la adición de HCl.



Nota. Tomado de Villavicencio, 2016

Una vez obtenido el hidróxido de aluminio se realizó un lavado con agua destilada, se secó y teniendo en cuenta la metodología empleada por Villavicencio (2016), se calcinó a 500 °C por 4 horas y se obtuvo la alúmina activada (figura 4, calcinación hidróxido de aluminio) para finalmente ser utilizada como lecho filtrante en la fase experimental. El proceso anterior se resume en la figura 5, metodología experimental para obtención de alúmina activada a partir de aluminio recuperado.

Figura 4

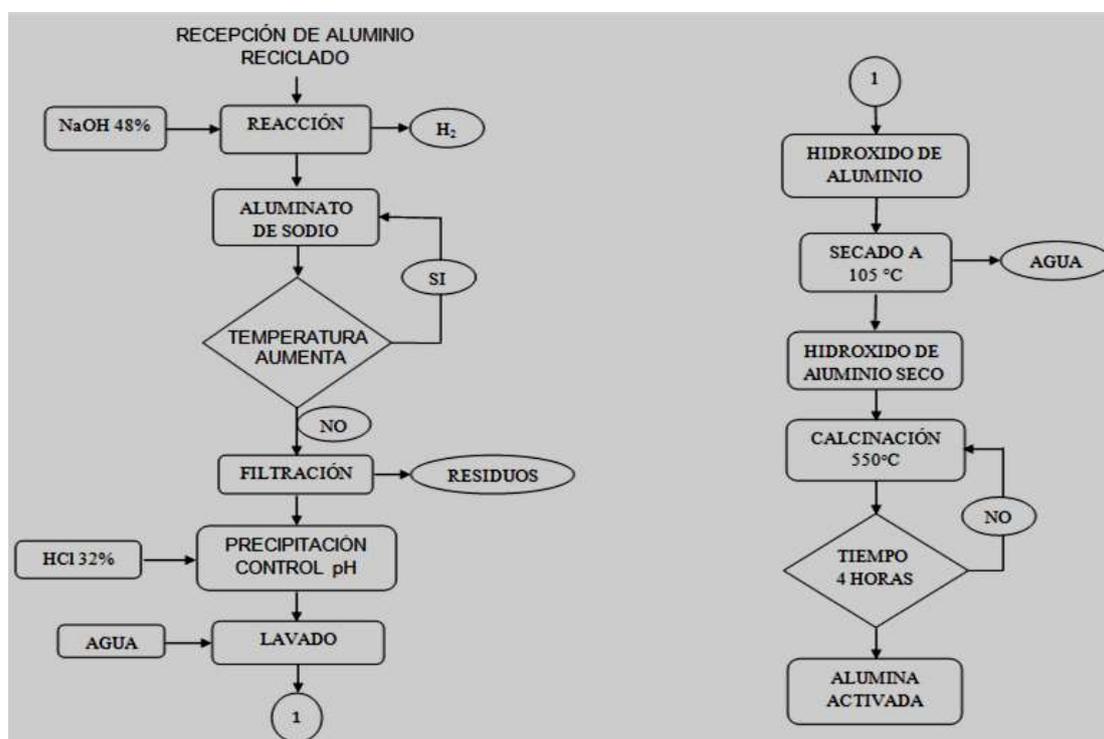
Calcinación Hidróxidos de Aluminio



En cuanto a la alúmina activada industrial, fue necesario para su activación adquirir el hidróxido de aluminio importado de tipo industrial elaborado a base de bauxita y calcinarlo a 500 °C por 4 horas (Figura 4), para otorgarle la capacidad de adsorción y posteriormente ser utilizado en la fase experimental.

Figura 5.

Metodología experimental para obtención de alúmina activada a partir de aluminio recuperado



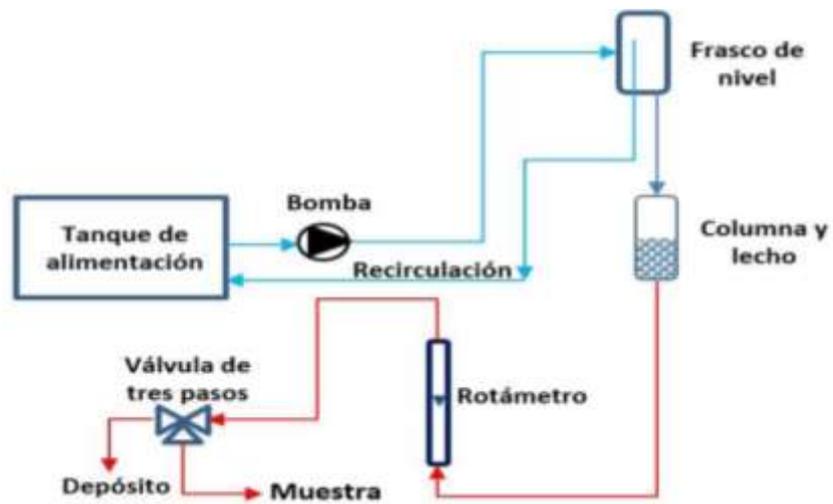
- **Elaboración del Montaje:** El montaje se realizó similar al elaborado por Hernández (2016), omitiendo el uso del rotámetro, frasco nivel y válvula tres pasos, como se muestra en las figuras 6, Montaje técnica en continuo con AA, y 7, Esquema de instalación para adsorción de fluoruros con AA en continuo. Para la columna donde se encuentra empacado el lecho, se utilizó un tubo de pvc de 2", una unión universal y una tela como soporte, para evitar pérdida de adsorbente por arrastre.

Figura 6.

Montaje técnica en continuo con AA

**Figura 7.**

Esquema de instalación para adsorción de fluoruros con AA en continuo



Nota. Tomado de Hernández, 2016

7. Etapa de Ensayos

El diseño que se planteó es un modelo experimental bifactorial de estructura 2X3, en donde el Factor 1 correspondió al tipo de alúmina activada (dos niveles: Alúmina sintetizada, alúmina tipo industrial) y el Factor 2 altura del lecho (tres niveles: 3cm, 5cm y 10 cm), con 3 repeticiones. Como tratamiento control, se tomaron en cuenta los valores de remoción de fluoruros que arrojó cada procedimiento aplicado a la muestra de agua problema y posteriormente se compararon con los valores iniciales, con el fin de evidenciar si los métodos aplicados a la solución inicial fueron productores o por el contrario no fueron representativos para la investigación.

Para llevar a cabo el diseño anterior, se establecieron las actividades de operatividad para correr las respectivas pruebas con las AA a diferentes alturas de lecho y concentración constante, de tal manera que se utilizó un depósito de almacenamiento que contenía la muestra problema (con concentración promedio de $3,7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de acuerdo a los análisis de las muestras de agua cruda del centro poblado) que alimentó la columna empacada gracias a la implementación de una bomba dosificadora, la cual bombeó el agua preparada hacia la columna empacada, manteniendo un flujo constante para un caudal de $10 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, para las diferentes alturas del lecho (3, 5 y 10 cm) y alúminas activadas. Una vez el agua atravesó el lecho, se tomaron alícuotas en intervalos regulares de tiempo, para determinar el contenido de fluoruros, hasta que se encontraron los valores referentes al punto y tiempo de ruptura (cuando el valor fue de $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ o el 27% de la concentración inicial) y al punto y tiempo de saturación (cuando el valor fue de $3,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ o el 95% de la concentración de entrada). Es necesario resaltar que cada procedimiento se hizo por triplicado con la intención de fundamentar los datos obtenidos.

8. Etapa de Análisis y Resultados

En esta etapa se practicaron los análisis químicos a las muestras de agua recolectadas durante la experiencia. Para ello, la medida de la concentración de fluoruros se realizó mediante un fotómetro spectroquant Nova 60, representado en la figura 8 y un kit fotométrico marca Merck para la determinación de fluoruros en aguas, figura 9.

Figura 9

Fotómetro Nova 60



Figura 8

Kit Merck determinación fluoruros



Es necesario aclarar que con antelación se llevó a cabo la determinación de Al_2O_3 (compuesto activo que permite la remoción) a cada uno de los hidróxidos de aluminio, de acuerdo a lo estipulado en el procedimiento ITC-001 de 2017 del sistema interno de la empresa química integrada Quinsa, el cual está basado en la NTC 531 6^a actualización de ICONTEC. La explicación de estos procedimientos se puede evidenciar en el capítulo 2 marco conceptual.

De igual forma la empresa puso a disposición el material volumétrico y las instalaciones de laboratorio necesarias, para la ejecución de la presente investigación.

La figura 10, resultado sin fluoruros, figura 11, ligero aumento de fluoruros, figura 12, aumento considerable de fluoruros y figura 13, alta presencia de fluoruros, evidencian los

cambios físicos que se presentaron en los tubos de ensayo, cada vez que se observaba un aumento considerable de fluoruros en las muestra, durante la marcha analítica.

Figura 11

Resultados sin fluoruros



Figura 10

Ligero aumento de fluoruros



Figura 13

Aumento considerable de fluoruros



Figura 12

Alta presencia de fluoruros



Obtenidos los valores en el fotómetro, se procedió a determinar la cantidad en mg de soluto adsorbido por gramo de adsorbente en los puntos de ruptura (q_r) y de saturación (q_s) para cada una de las experiencias, por medio de la ecuación (4).

$$q = \frac{Q_v t C_o}{1000m} \quad (\text{Ecuación 4})$$

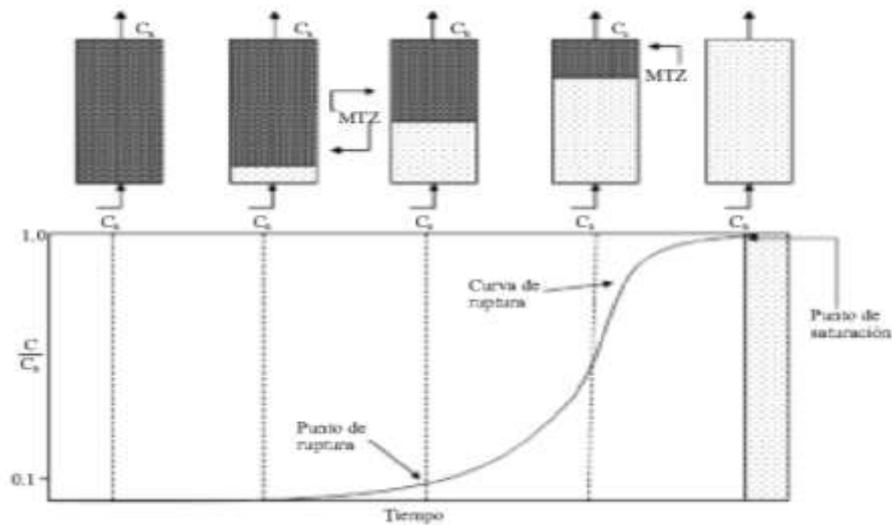
Nota. Tomado de Valencia y Castellar, 2012

Donde t es el tiempo de servicio (min) obtenido cuando la concentración de soluto a la salida de la columna es el 27% de la concentración inicial ($1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) o de entrada (punto de ruptura) y cuando la concentración a la salida de la columna es el 95% ($3,5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de la concentración inicial (punto de saturación), C_o ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) es la concentración inicial de fluoruros o de entrada a la columna, Q_v ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$) es el flujo volumétrico o caudal de entrada, m (g) es la masa del adsorbente y 1000 corresponde a un factor de conversión.

Posteriormente se realizaron las curvas de ruptura pertinentes, como se puede apreciar en la figura 14 (Curva de ruptura mostrando el movimiento de la (MTZ)), donde se observa una columna empacada con un material adsorbente en contacto con un líquido que contiene un soluto (adsorbible) de concentración C_o . Inicialmente la parte inferior del adsorbente remueve rápidamente el soluto, así que el fluido que sale de la columna está prácticamente libre de adsorbible. Como el volumen del líquido que atraviesa la columna aumenta, la zona de transferencia de masa (MTZ) comienza a desplazarse y la concentración del adsorbible a la salida aumenta con el tiempo. Se denomina punto de ruptura (q_r) al valor máximo en la concentración del adsorbible que se puede permitir a la salida de la columna, y al tiempo empleado para alcanzar esta concentración específica se le llama tiempo de ruptura (t_r) para cada una de las condiciones de operación de la columna. La curva que resulta de graficar la relación $C_s/C_o - 1$ en función del tiempo se conoce como curva de ruptura. (Valencia y Castellar, 2012, p. x)

Figura 14

Curva de ruptura mostrando el movimiento de la (MTZ)



Nota. Tomado de Valencia y Castellar, 2012

Finalmente, determinadas las capacidades de adsorción de fluoruros para cada AA, se realizó un comparativo entre ambos, con el fin de conocer eficiencia en tiempos de remoción, tasas removidas, comportamientos a lo largo de la experiencia etc.

9. Análisis Estadístico

Se recolectó la información de las pruebas realizadas en laboratorio y se tabularon los datos en Microsoft Excel. El análisis estadístico de los resultados obtenidos se efectuó mediante comparación de los promedios entre los distintos tratamientos, soportados con gráficos de líneas que retratan el comportamiento de cada marcha, hasta alcanzar el punto de ruptura y saturación, de acuerdo con el diseño experimental planteado.

Capítulo 4

Resultados y Análisis

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, donde se evidenció el comportamiento y la capacidad de adsorción de la AA industrial y la AA sintetizada a partir de latas de aluminio reciclable, al ser sometidas a caudal constante (Q), concentración de flúor constante ($[F^-]$), una masa de adsorbente (m) y diferentes alturas de lecho filtrante (h). Las tablas de datos están compuestas de 3 repeticiones, llevado a cabo de esta manera con el objeto de fundamentar el trabajo, estas a su vez están conformadas por tiempo (T en minutos), concentración de flúor a la salida de la columna (C_s en $mg \cdot L^{-1}$), volumen de agua tratada (V_T en mL) y la relación entre la concentración de flúor a la salida de la columna y la concentración de flúor inicial ($C_s \cdot C_0^{-1}$). Adicional a esto, la repetición seleccionada, así como el punto de ruptura y de saturación, fueron resaltados mediante la siguiente convención de colores (**Amarillo**, **Azul** y **verde**) respectivamente. Por último, se encuentran los gráficos donde se observó la conducta de cada repetición con el fin de seleccionar la serie de datos de mejor desempeño para posteriormente comparar el rendimiento de las alúminas activadas en su respectiva altura de lecho, seguido de su pertinente análisis.

La tabla 3 contiene los datos experimentales correspondientes a los ensayos elaborados con AA industrial, a una altura de 3 cm y diferentes condiciones operacionales.

Tabla 3.

Datos experimentales obtenidos con AA industrial $h= 3cm$ y diferentes condiciones de operación

T	Q= 10 mL*min ⁻¹			[C ₀]= 3.7 mg*L ⁻¹			h= 3 cm		m= 90g
	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹
30	0,17	280	0,046	0,3	290	0,081	0,15	280	0,041
60	0,23	580	0,062	0,39	580	0,105	0,17	580	0,046
180	0,48	1770	0,130	1,29	1780	0,349	0,25	1780	0,068

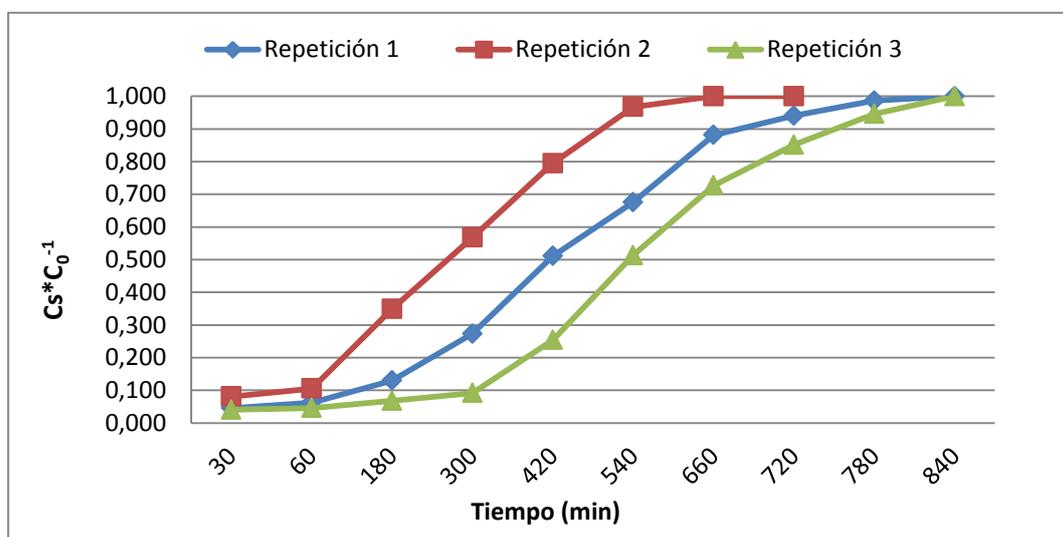
T	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$
300	1,01	2970	0,273	2,1	2980	0,568	0,34	2970	0,092
420	1,89	4170	0,511	2,94	4170	0,795	0,94	4170	0,254
540	2,5	5360	0,676	3,58	5370	0,968	1,9	5350	0,514
660	3,26	6540	0,881	3,7	6560	1,000	2,69	6540	0,727
720	3,48	7140	0,94	3,7	7150	1,000	3,15	7130	0,851
780	3,65	7730	0,986	-	-	-	3,5	7720	0,946
840	3,7	8330	1,000	-	-	-	3,7	8310	1,000

Nota. El significado de cada abreviatura se encuentra en el encabezado del capítulo 4

En la figura 15, curvas de ruptura AA industrial $h=3$, se puede apreciar un comportamiento bien diferenciado para cada una de las repeticiones con AA industrial a una altura de lecho de 3 cm, donde la repetición 3 es la sección de datos de mejor comportamiento, debido a que para encontrar el punto de ruptura pasó un tiempo considerablemente mayor con relación a las otras dos repeticiones, lo cual indica mayor eficiencia de la columna al momento de remover fluoruros por adsorción. Por tal motivo la repetición 3 fue seleccionada para la fase comparativa con AA sintetizada a una altura de 3 cm.

Figura 15

Curvas de ruptura AA industrial $h=3$



Nota. En el eje Y, la expresión ($C_s \cdot C_0^{-1}$) hace referencia a la relación entre la concentración de flúor a la salida de la columna y la concentración de flúor inicial.

La tabla 4, contiene los datos experimentales correspondientes a los ensayos elaborados con AA industrial, a una altura de 5 cm y diferentes condiciones operacionales.

Tabla 4.

Datos experimentales obtenidos con AA industrial h= 5cm y diferentes condiciones de operación

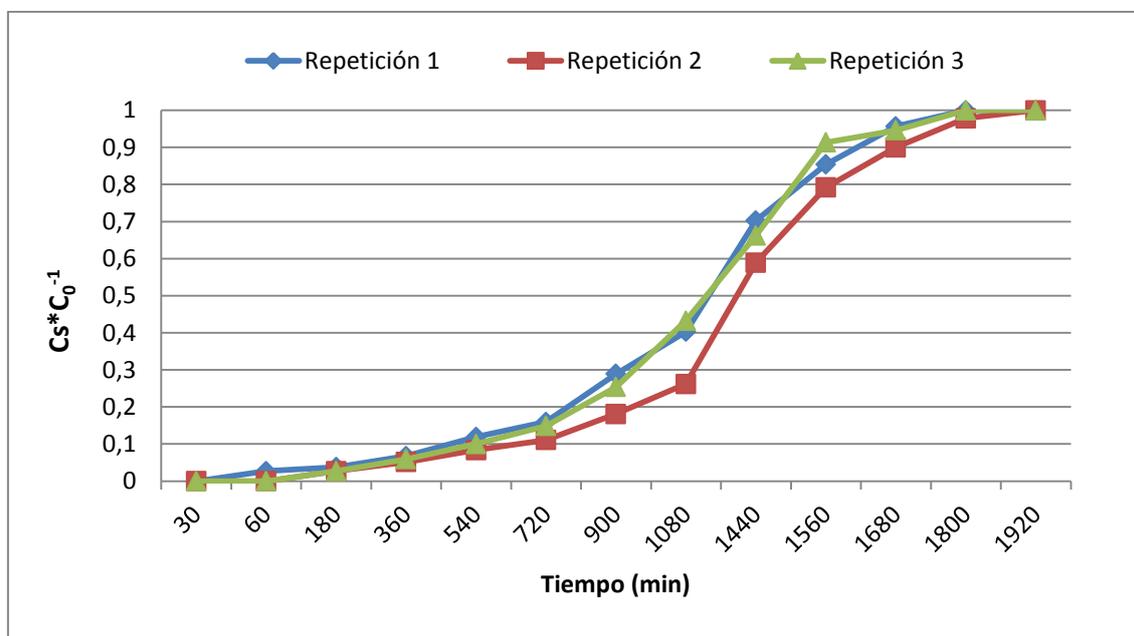
Q= 10 mL*min ⁻¹ [C ₀]= 3.7 mg*L ⁻¹ h= 5 cm m= 154 g									
T	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹
30	0	250	0	0	240	0,000	0	250	0
60	0,1	510	0,027	0	570	0,000	0	560	0
180	0,14	1730	0,038	0,1	1750	0,027	0,1	1760	0,027
360	0,25	3520	0,068	0,19	3550	0,051	0,22	3550	0,059
540	0,44	5310	0,119	0,31	5350	0,084	0,37	5350	0,10
720	0,59	7110	0,159	0,41	7140	0,111	0,55	7150	0,149
900	1,07	8900	0,289	0,67	8940	0,181	0,94	8940	0,254
1080	1,49	10700	0,403	0,97	10730	0,262	1,6	10740	0,432
1440	2,6	14270	0,703	2,18	14280	0,589	2,45	14320	0,662
1560	3,16	15470	0,854	2,93	15480	0,792	3,38	15500	0,914
1680	3,54	16660	0,957	3,33	16670	0,900	3,5	16700	0,946
1800	3,7	17830	1,00	3,62	17840	0,978	3,7	17890	1,00
1920	3,7	19020	1,00	3,7	19030	1,00	3,7	19080	1,00

Nota. El significado de cada abreviatura se encuentra en el encabezado del capítulo 4

En la figura 16, curvas de ruptura AA industrial h=5, las líneas de datos se encuentran un poco más interrelacionadas, lo que muestra un comportamiento similar de las 3 repeticiones para columnas de 5 cm, siendo la repetición numero 2 la más destacada por prolongar su accionar y remover mayor cantidad de adsorbato hasta encontrar el punto de ruptura. Esta repetición fue seleccionada en representación de la AA industrial a una altura de 5 cm.

Figura 16

Curvas de ruptura AA industrial h=5



Nota. En el eje Y, la expresión $(C_s \cdot C_0^{-1})$ hace referencia a la relación entre la concentración de flúor a la salida de la columna y la concentración de flúor inicial.

A continuación, se presenta la tabla 5, la cual alberga los datos experimentales correspondientes a los ensayos elaborados con AA industrial, a una altura de 10 cm y diferentes condiciones operacionales.

Tabla 5

Datos experimentales obtenidos con AA industrial h= 10cm y diferentes condiciones de operación

Q= 10 mL*min ⁻¹ [C ₀]= 3.7 mg*L ⁻¹ h= 10 cm m= 302 g									
T	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹
60	0	500	0	0	490	0,000	0	500	0
180	0	1700	0	0	1690	0,000	0	1700	0
360	0,16	3490	0,043	0,1	3490	0,027	0,11	3500	0,030
720	0,21	7090	0,057	0,15	7090	0,041	0,3	7090	0,081

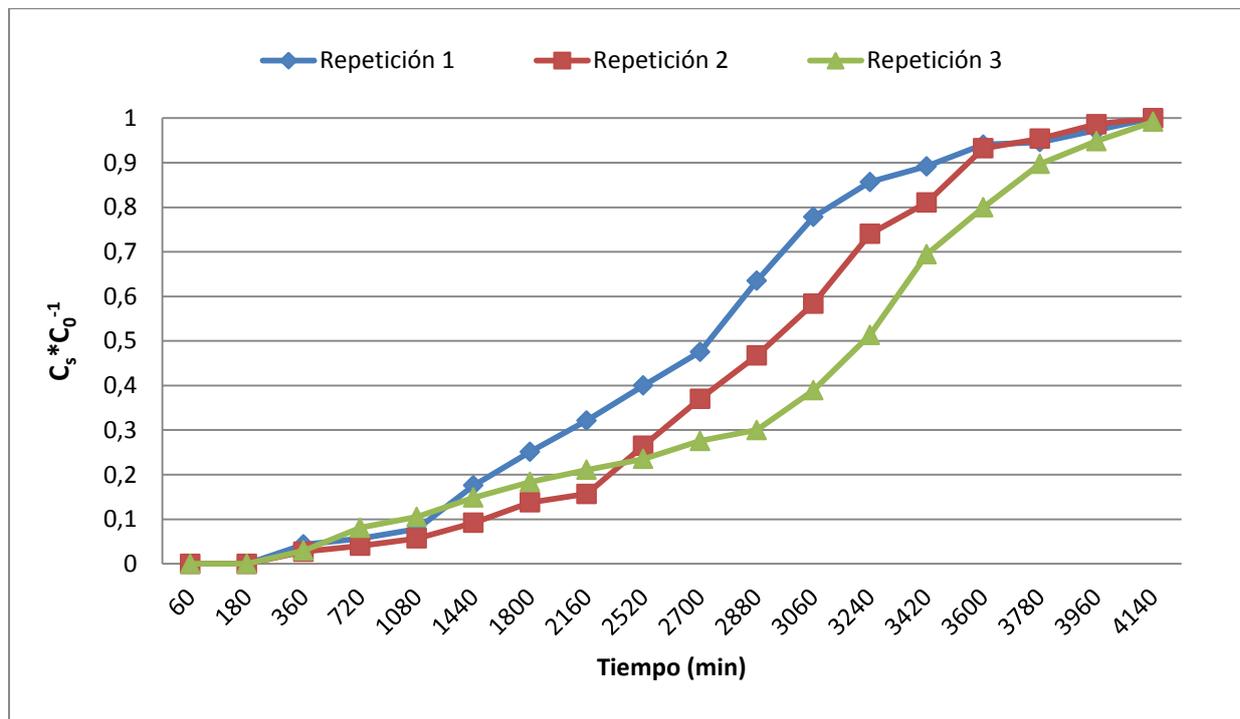
T	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$
1080	0,29	10670	0,078	0,21	10680	0,057	0,39	10670	0,105
1440	0,65	14250	0,176	0,34	14250	0,092	0,55	14250	0,149
1800	0,93	17850	0,251	0,51	17840	0,138	0,68	17840	0,184
2160	1,19	21430	0,322	0,58	21430	0,157	0,78	21430	0,211
2520	1,48	25030	0,400	0,98	25020	0,265	0,87	25030	0,235
2700	1,76	26830	0,476	1,37	26820	0,370	1,02	26820	0,276
2880	2,35	28620	0,635	1,73	28620	0,468	1,11	28620	0,300
3060	2,88	30420	0,778	2,16	30410	0,584	1,44	30420	0,389
3240	3,17	32220	0,857	2,74	32200	0,741	1,9	32210	0,514
3420	3,3	34000	0,892	3,0	34000	0,811	2,57	34000	0,695
3600	3,48	35800	0,941	3,45	35800	0,932	2,96	35800	0,800
3780	3,5	37600	0,946	3,53	37590	0,954	3,32	37600	0,897
3960	3,6	39380	0,973	3,65	39380	0,986	3,51	39400	0,949
4140	3,7	41150	1,00	3,7	41160	1,000	3,67	41180	0,992

Nota. El significado de cada abreviatura se encuentra en el encabezado del capítulo 4

Por último, para la AA industrial en columnas de 10 cm, se evidenció un dispendioso tiempo de hasta 69 horas para cada repetición, resultados que revelan que a mayor altura del lecho filtrante se prolonga el accionar de la columna aumentando los tiempos de ruptura y saturación. Para esta experiencia la repetición 3 fue seleccionada, aunque en la figura 17, Curvas de ruptura AA industrial h=10, se aprecie un rápido aumento en los índices de flúor a la salida de la columna, logró estabilizarse superando los rendimientos de las repeticiones 1 y 2.

Figura 17

Curvas de ruptura AA industrial $h=10$



Nota. En el eje Y, la expresión ($C_s * C_0^{-1}$) hace referencia a la relación entre la concentración de flúor a la salida de la columna y la concentración de flúor inicial.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las prácticas realizadas con AA sintetizada a partir de latas de aluminio reciclable, comenzando con la tabla 6, Datos experimentales obtenidos con AA sintetizada $h= 3\text{cm}$ y diferentes condiciones de operación.

Tabla 6.

Datos experimentales obtenidos con AA sintetizada $h= 3\text{cm}$ y diferentes condiciones de operación

Q= 10 mL*min ⁻¹ [C ₀]= 3.7 mg*L ⁻¹ h= 3 cm m= 90 g									
T	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹
30	0,3	250	0,081	0,34	250	0,092	0,28	260	0,076
60	0,37	540	0,100	0,45	540	0,122	0,32	550	0,086
180	0,74	1710	0,200	1,10	1720	0,297	0,56	1730	0,151
300	1,49	2900	0,403	1,87	2910	0,505	1,19	2920	0,322

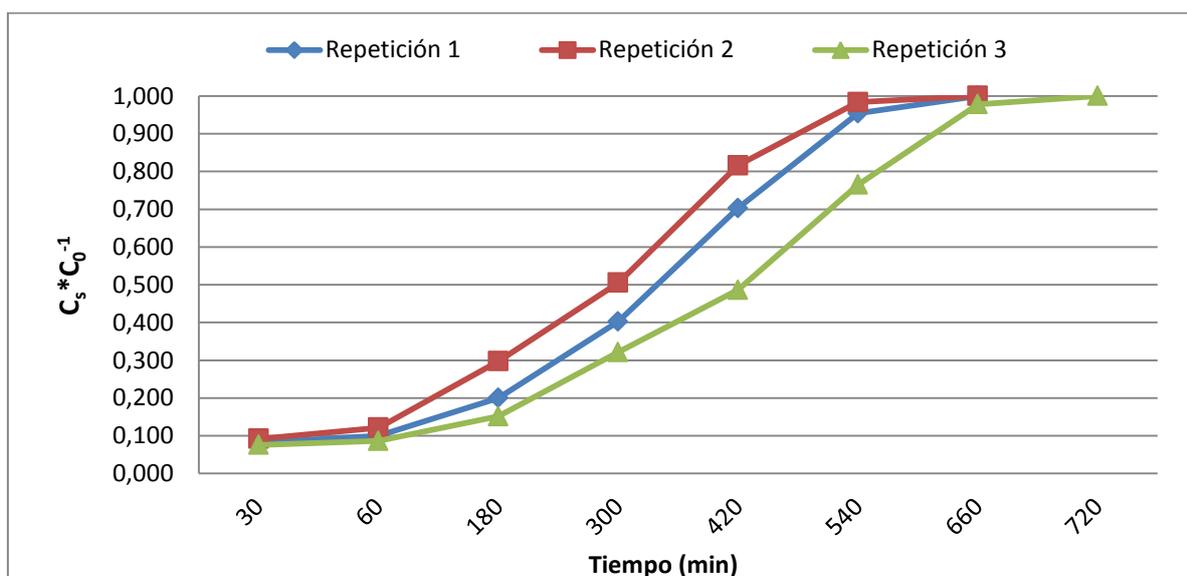
T	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$
420	2,60	4100	0,703	3,02	4100	0,816	1,8	4110	0,486
540	3,53	5280	0,954	3,64	5300	0,984	2,83	5310	0,765
660	3,7	6470	1,000	3,7	6490	1,000	3,62	6500	0,978
720	-	-	-	-	-	-	3,7	7100	1,000

Nota. El significado de cada abreviatura se encuentra en el encabezado del capítulo 4

La figura 18, curvas de ruptura AA sintetizada $h=3$, muestra el desempeño de la alúmina activada sintetizada a una altura del lecho de 3 cm, allí se puede observar una disminución significativa en el rendimiento con respecto a su homóloga para esta misma altura, ya que la columna se satura rápidamente en un menor tiempo de uso. Para esta experiencia se seleccionó la repetición 3 en la cual se encontraron los puntos de ruptura y saturación en un espacio de tiempo mayor al de las otras dos repeticiones, indicando mayor eficiencia.

Figura 18

Curvas de ruptura AA sintetizada $h=3$



Nota. En el eje Y, la expresión ($C_s * C_0^{-1}$) hace referencia a la relación entre la concentración de flúor a la salida de la columna y la concentración de flúor inicial.

La tabla 7, contiene los datos experimentales correspondientes a los ensayos elaborados con AA sintetizada, a una altura de 5 cm y diferentes condiciones operacionales.

Tabla 7

Datos experimentales obtenidos con AA sintetizada $h= 5\text{cm}$ y diferentes condiciones de operación

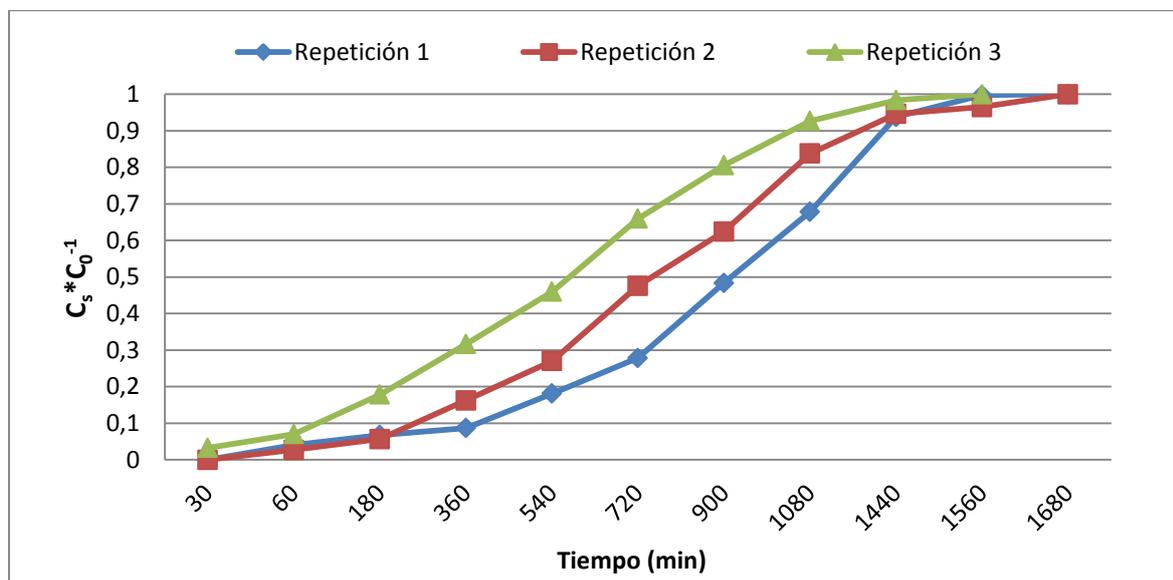
Q= 10 mL*min ⁻¹ [C ₀]= 3.7 mg*L ⁻¹ h= 5 cm m= 154 g									
T	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹
30	0	250	0	0	250	0,000	0,12	250	0,032
60	0,15	500	0,041	0,1	500	0,027	0,26	500	0,070
180	0,25	1700	0,068	0,21	1700	0,057	0,66	1700	0,178
360	0,32	3480	0,086	0,60	3480	0,162	1,17	3480	0,316
540	0,67	5280	0,181	1,00	5280	0,270	1,7	5280	0,459
720	1,03	7080	0,278	1,76	7060	0,476	2,44	7080	0,659
900	1,79	8850	0,484	2,31	8860	0,624	2,98	8880	0,805
1080	2,51	10640	0,678	3,1	10650	0,838	3,43	10660	0,927
1440	3,47	14200	0,938	3,50	14200	0,946	3,64	14240	0,984
1560	3,69	15400	0,997	3,57	15400	0,965	3,7	15440	1,000
1680	3,7	16580	1,00	3,7	16600	1,000	-	-	-

Nota. El significado de cada abreviatura se encuentra en el encabezado del capítulo 4

Para el caso de la AA sintetizada a una altura de 5 cm, se observó en la figura 19, Curvas de ruptura AA sintetizada $h=5$, que la curva de la repetición 1 presentó el mejor comportamiento; ampliando su accionar por encima del desempeño de las otras dos repeticiones, por ende, fue seleccionada para la fase comparativa.

Figura 19

Curvas de ruptura AA sintetizada $h=5$



Nota. En el eje Y, la expresión ($C_s * C_0^{-1}$) hace referencia a la relación entre la concentración de flúor a la salida de la columna y la concentración de flúor inicial.

La tabla 8, contiene los datos experimentales correspondientes a los ensayos elaborados con AA sintetizada, a una altura de 10 cm y diferentes condiciones operacionales.

Tabla 8

Datos experimentales obtenidos con AA sintetizada $h= 10\text{cm}$ y diferentes condiciones de operación

Q= 10 mL*min ⁻¹ [C ₀]= 3.7 mg*L ⁻¹ h= 10 cm m= 302 g									
T	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹	C _s	V _T	C _s *C ₀ ⁻¹
60	0	480	0,000	0	500	0,000	0	500	0,000
180	0	1670	0,000	0	1700	0,000	0	1700	0,000
360	0,11	3400	0,030	0,1	3400	0,027	0,27	3400	0,073
720	0,22	6970	0,059	0,31	7000	0,084	0,69	7000	0,186
1080	0,44	10500	0,119	0,57	10500	0,154	1,13	10500	0,305
1440	0,67	14050	0,181	0,73	14050	0,197	1,41	14000	0,381
1800	0,89	17600	0,241	0,98	17600	0,265	1,55	17600	0,419
2160	1,10	21180	0,297	1,21	21180	0,327	1,78	21150	0,481

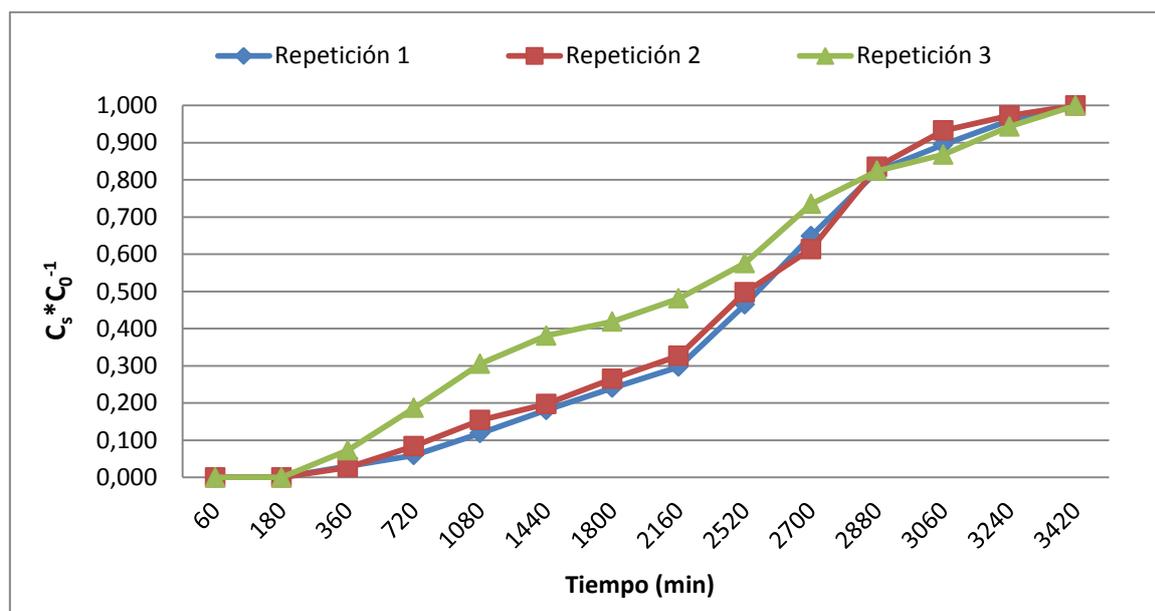
T	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$	C_s	V_T	$C_s * C_0^{-1}$
2520	1,72	24750	0,465	1,84	24750	0,497	2,13	24750	0,576
2700	2,4	26550	0,649	2,27	26550	0,614	2,72	26550	0,735
2880	3,05	28320	0,824	3,09	28350	0,835	3,05	28350	0,824
3060	3,31	30100	0,895	3,45	30070	0,932	3,21	30050	0,868
3240	3,55	31900	0,959	3,6	31850	0,973	3,49	31840	0,943
3420	3,7	33680	1,000	3,7	33650	1,000	3,7	33640	1,000

Nota. El significado de cada abreviatura se encuentra en el encabezado del capítulo 4

Por último, en la gráfica 20, curvas de ruptura AA sintetizada $h=10$, se puede observar el comportamiento que se obtuvo al remover fluoruros con una columna de AA sintetizada de 10 cm de alto, en donde la repetición 1 y 2 tienen un comportamiento prácticamente similar durante el tiempo de reacción, siendo seleccionada la repetición 1 por ser la experiencia que ligeramente necesitó más tiempo para hallar el punto de ruptura y el punto de saturación del lecho filtrante.

Figura 20

Curvas de ruptura AA sintetizada $h=10$



Nota. En el eje *Y*, la expresión $(C_s * C_0^{-1})$ hace referencia a la relación entre la concentración de flúor a la salida de la columna y la concentración de flúor inicial.

Finalizada la fase experimental, la cual se elaboró por triplicado para cada una de las prácticas con el fin de fundamentar los datos, minimizar errores y encontrar la sección de resultados de mejor desempeño para cada de las experiencias, se manifiestan los siguientes aspectos importantes.

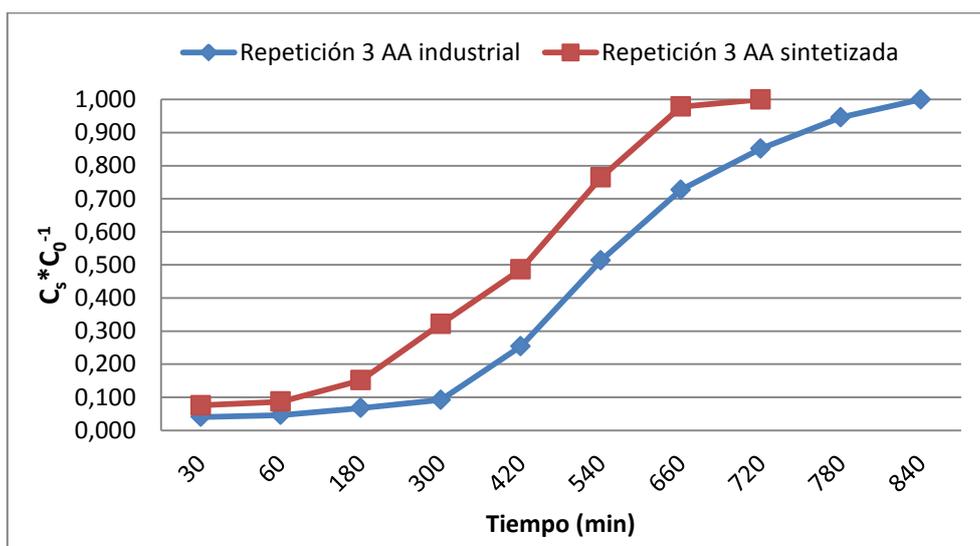
- Las escalas de tiempo empleadas para la toma de muestras, varían de acuerdo a la altura de la columna, debido a que el tiempo para encontrar el punto de ruptura y saturación de cada lecho filtrante son directamente proporcionales a la cantidad de adsorbente presente. Esto quiere decir, que mientras para una columna con AA industrial de 3 cm se necesitó de 7 horas para encontrar el punto de ruptura, para una columna de 10 cm se requirió de 45 horas. Si se hubiese tomado una muestra por hora, los datos no serían significativos y tanto el número de análisis como los costos de los mismos se incrementarían considerablemente. Por tal razón se elaboró de esta manera.
- Otro aspecto importante es la cantidad de agua tratada, a medida que se aumentó la altura se dificultó a la muestra problema pasar por entre los poros del material adsorbente, por tal motivo se observó una disminución consistente de agua tratada con relación al agua que entraba al sistema a medida que se aumentaba la altura.
- El tamaño de las partículas de las alúminas jugó también un papel importante a la hora de la filtración, ya que la granulometría de la AA sintetizada presentó una consistencia mucho más fina que la de su homóloga industrial, lo que generó una columna de agua bastante alta sobre el lecho filtrante hasta llegar a

un punto donde se estabilizó. Un claro ejemplo se aprecia en los resultados de las experiencias de 10 centímetros, donde se puede observar que con el lecho filtrante elaborado con AA industrial para un tiempo de 69 horas, se produjo una diferencia de casi 250 mL de agua tratada con respecto al volumen de entrada. En el caso de la AA sintetizada esa diferencia para un tiempo de 57 horas fue de 520 mL, lo cual fundamento lo expresado con antelación.

Una vez recolectada y tabulada la información de la fase experimental, se procedió a comparar los resultados de la mejor serie de datos de cada práctica con AA en su respectiva altura de lecho, evidenciadas en la figura 21, Comparación rendimiento de AA Industrial y AA Sintetizada $h= 3$ cm, la figura 22, Comparación rendimiento de AA Industrial y AA Sintetizada $h= 5$ cm y la figura 23, Comparación rendimiento de AA Industrial y AA Sintetizada $h= 10$ cm, con el fin de contrastar el desempeño, determinar semejanzas y diferencias e identificar la capacidad de adsorción (q_t) y (q_s) para cada material adsorbente.

Figura 21

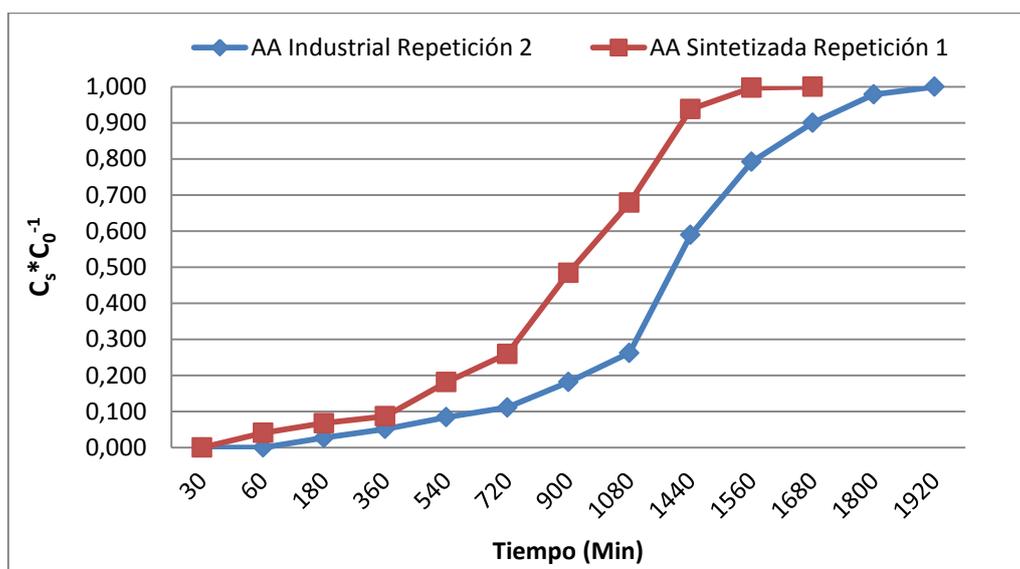
Comparación rendimiento de AA Ind y AA Sint $h= 3$ cm



Nota. En el eje Y, la expresión $(C_s * C_0^{-1})$ hace referencia a la relación entre la concentración de flúor a la salida de la columna y la concentración de flúor inicial.

Figura 22

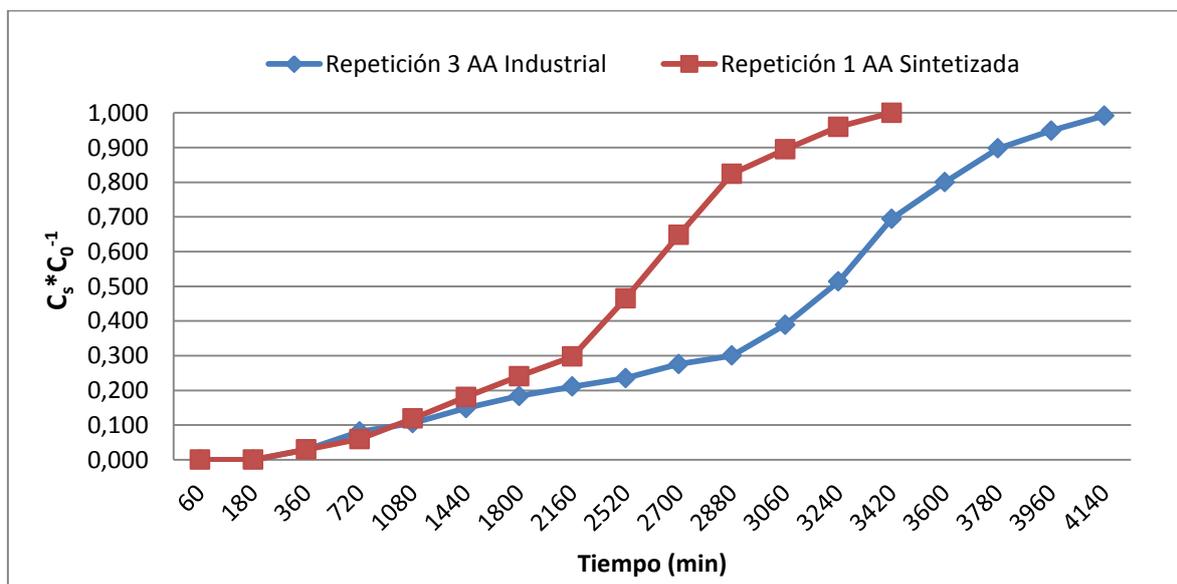
Comparación rendimiento de AA Ind y AA Sint h= 5 cm



Nota. En el eje Y, la expresión $(C_s * C_0^{-1})$ hace referencia a la relación entre la concentración de flúor a la salida de la columna y la concentración de flúor inicial.

Figura 23

Comparación rendimiento de AA Ind y AA Sint h= 10 cm



Nota. En el eje Y, la expresión $(C_s * C_0^{-1})$ hace referencia a la relación entre la concentración de flúor a la salida de la columna y la concentración de flúor inicial.

Utilizando la ecuación (4) se establecieron los valores de la capacidad de adsorción en el punto de ruptura (q_r) y saturación (q_s) para cada una de las alúminas objeto de estudio dadas las alturas utilizadas, y se expresan en las tablas 9, capacidad de adsorción de las alúminas en (q_r) y 10, capacidad de adsorción de las alúminas en (q_s)

Tabla 9

Capacidad de adsorción de las alúminas en el punto de ruptura (q_r)

Altura de la columna (cm)	AA Industrial (mg F ⁻ *(g Al ₂ O ₃) ⁻¹)	AA Sintetizada (mg F ⁻ *(g Al ₂ O ₃) ⁻¹)
3	0.173	0.123
5	0,259	0.172
10	0,331	0.264

Nota. Los valores dados en las columnas 2 y 3 de izquierda a derecha, corresponden a la capacidad de adsorción de cada AA en el punto de ruptura, dada la ecuación 4.

Tabla 10

Capacidad de adsorción de las alúminas en el punto de Saturación (q_s)

Altura de la columna (cm)	AA Industrial (mg F ⁻ *(g Al ₂ O ₃) ⁻¹)	AA Sintetizada (mg F ⁻ *(g Al ₂ O ₃) ⁻¹)
3	0.321	0.271
5	0.432	0.346
10	0.485	0.397

Nota. Los valores dados en las columnas 2 y 3 de izquierda a derecha, corresponden a la capacidad de adsorción de cada AA en el punto de saturación, dada la ecuación 4.

De acuerdo a las figuras comparativas 21 22 y 23 y las tablas 9 y 10, finalmente se puede analizar qué:

➤ El comportamiento de los adsorbentes en la fase experimental, concuerda con lo expresado en la figura 14, la cual muestra cómo se desplaza la zona de transferencia de masa a medida que la concentración de flúor a la salida de la columna aumenta con el tiempo, cuando el volumen del líquido que atraviesa la columna aumenta. En ese orden de ideas, para una concentración inicial de $3,7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y un flujo volumétrico de $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, el tiempo de ruptura aumentó desde 7 a 45 horas aproximadamente para la AA industrial y de 5 a 36 horas con la AA sintetizada, cuando se incrementa la altura de 3 a 10 cm. Esto indica que, al aumentar la altura del lecho, se incrementa el tiempo de ruptura, por lo tanto, la cantidad de flúor removido.

➤ Observando las tablas 9 y 10, asociadas a las capacidades de adsorción en los puntos de ruptura y saturación, se puede apreciar un incremento paulatino de los valores a medida que la altura de la columna empacada aumenta. Este comportamiento concuerda con lo expresado por Valencia y Castellar (2012) quienes explican que esto se debe a que

Cuando la altura del lecho se reduce predomina el fenómeno de dispersión axial en la transferencia de masa, por lo tanto, los iones no tienen suficiente tiempo para difundirse en toda la masa de adsorbente. Por otro lado, al aumentar la altura del lecho también se incrementa el área superficial del adsorbente, disponiéndose de más sitios de unión para la adsorción; en consecuencia, la capacidad de adsorción del lecho en el punto de ruptura y saturación se incrementa. (p.9)

➤ Con respecto al volumen de agua tratado, al detallar las tablas de datos experimentales se identifica una relación directamente proporcional con la altura del lecho filtrante, pues al aumentar la masa del adsorbente, se amplía el área superficial de acción, permitiendo tratar mayor volumen para una columna de 10 cm con respecto a una de 3 cm, hasta encontrar los puntos de ruptura o saturación.

- Aunque ambos compuestos son eficaces, ya que ambos cumplen con el objetivo principal el cual es remover fluoruros, la AA industrial presenta mayor eficiencia con respecto a su homóloga sintetizada. El argumento anterior se puede soportar, no solo en los resultados de las tablas de capacidad de adsorción (q_r) y (q_s), sino también en los tiempos y volúmenes de agua tratados durante la experiencia. Este comportamiento puede estar directamente relacionado con el contenido de Al_2O_3 (compuesto activo que permite la remoción de fluoruros por adsorción) que presentan las AA, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos al llevar a cabo el procedimiento ITC-001 de 2017 del protocolo interno de la empresa QUINSA para la determinación de óxido de aluminio, se evidenció un contenido de 65% de Al_2O_3 en la AA industrial mientras que la AA sintetizada contiene un total de 58%. Esta diferencia puede influir en los resultados presentados.
- Por último, se puede analizar que la AA industrial posee mayor capacidad de adsorción de fluoruros que la AA sintetizada, teniendo en cuenta que los valores en miligramos de adsorbato por gramo de adsorbente son mayores para la AA industrial que para la AA sintetizada. Pese a que no son considerablemente altos, la diferencia persiste.

Conclusiones

Finalizada la investigación, se puede concluir que:

- La alúmina activada sintetizada demostró resultados prometedores al presentar un alto rendimiento en la remoción de fluoruros, superando todas las expectativas. De acuerdo a lo anterior, los desechos de aluminio pueden ser una buena alternativa para reemplazar la bauxita como materia prima en la elaboración de dicho compuesto, dada alguna circunstancia desfavorable en su obtención.

- La capacidad de adsorción depende en gran medida del caudal, del ión fluoruro de entrada y de la altura del lecho, y es mayor en condiciones de tiempo de contacto elevado.
- La AA industrial es más eficiente que la AA sintetizada, ya que según los valores presentados en las tablas 9 y 10 correspondientes a las capacidades de adsorción en los puntos de ruptura y saturación de cada compuesto, remueve mayor cantidad de flúor por gramo de adsorbente.
- Teniendo en cuenta los resultados de remoción arrojados en la fase experimental, es acertado mencionar que la implementación de una capa de alúmina activada en el lecho filtrante de la planta modular del Centro poblado El Juncal, podría reducir considerablemente los índices de fluoruros que allí se presentan, al igual que las afecciones a la salud pública.
- Por último, se concluye que, las capacidades de adsorción de la AA sintetizada, para una altura del lecho de 3, 5 y 10 centímetros son: 0,123 (mg F⁻*(g Al₂O₃)⁻¹), 0,172 (mg F⁻*(g Al₂O₃)⁻¹) y 0,264 (mg F⁻*(g Al₂O₃)⁻¹) en el punto de ruptura y 0,271 (mg F⁻*(g Al₂O₃)⁻¹), 0,346 (mg F⁻*(g Al₂O₃)⁻¹) y 0,397 (mg F⁻*(g Al₂O₃)⁻¹) en el punto de saturación respectivamente.

Recomendaciones

- Existe una relación directamente proporcional entre el tamaño de la columna, el volumen tratado y los tiempos de ruptura y saturación, es por ello que, al aumentar progresivamente la altura del lecho, las variables dependientes que son el tiempo de ruptura, saturación y el volumen de agua tratado, aumentan consistentemente. De acuerdo a lo anterior, es necesario definir las escalas de tiempos para la toma de muestras, en aras de disminuir costos para un diseño experimental de este tipo.
- Al momento de empezar la filtración con AA sintetizada se observó un filtrado líquido de coloración amarilla, lo que pudo ser ocasionado por la pintura presente en las latas. Para eliminar este residuo es necesario, realizar una previa remoción de la pintura de las latas con H_2SO_4 concentrado o realizar un lavado previo una vez elaborada la alúmina con agua destilada con el fin de remover impurezas presentes.
- Para industrializar la remoción de fluoruros mediante la técnica en continuo con alúmina activada, es necesario determinar una altura del lecho y un caudal óptimo que permita una buena fluidez del líquido a tratar, ya que si bien es cierto que a medida que se aumenta la masa del adsorbente aumenta igualmente su capacidad de adsorción, es probable que se presenten problemas en cuanto a la filtración se refiere y, según algunos autores, al aumento de aluminio residual en el producto terminado.
- Para permitir una fluidez óptima, es igualmente importante considerar un buen tamaño de las partículas del adsorbente con el fin de aumentar su porosidad y facilitar la filtración.
- Una vez el material adsorbente esté completamente saturado, se puede realizar una reactivación por retrolavado, el cual consiste en lavar el material con agua a presión, con el fin de eliminar el exceso de fluoruros y activar su accionar una vez más,

teniendo en cuenta implementar unas condiciones de manejo del agua residual, con el fin de evitar contaminar otros espacios. Cuando esta opción no sea viable, se puede regenerar el material adsorbente, mediante el paso de una disolución de sosa caustica a través de la alúmina, eliminando así la saturación por fluoruros, procurando neutralizar y disponer el lixiviado.

- por último, si el deseo es sustituir el material, se puede hacer una disposición en una piscina, tomar el pH final y neutralizar para finalmente disponer en un relleno.

Referencias

- Acosta, G., Coy, C., Bourdón, A., y Cuervo, E. (2013). La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Revista Facultad de Ciencias Básica*,9(2): 306-317
- Aghapour, A., Khorsandi, H., Dehghani, A., y Karimzade, S. (2017). Preparación caracterización y aplicación de alúmina activada (AA) a partir de lodos de alumbre para la adsorción de flúor a partir de soluciones acuosas: nuevo enfoque para el reciclaje de lodos de alumbre. *Revista Water Science & Technology: Water Supply*, 1-7. Doi: 10.2166/ws.2018.006
- Aliota, P., Celis, M., Juárez, D., Merli, G., Ricciuti, N., Salinas, N., Siles, A., Stoklas, C., y Suquele, C. (2008). *Potabilización de aguas subterráneas: remoción de flúor*. (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.
- Aguilera, E., Ortiz, J., y Sánchez, M. (2013). Adsorbentes para la deshidratación de gas húmedo dulce: Avances y tendencias. *Revista Scielo analytics*. Versión Online ISSN 2224 - 6185.
- Carbotecnia, (2020). *¿Cuál es la diferencia entre absorción y adsorción?*. Guadalajara, México. Recuperado de www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/diferencia-entre-absorcion-y-adsorcion/.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS),. (2002) *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua*, Lima, Perú: Compañía Estadual de Tecnología de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas (CETESB).
- Ciencia. (21 de Agosto de 2019). Polémico estudio vincula flúor del agua con menor coeficiente intelectual. *Revista Semana*, pp. 1.
- Cogollo, J. (2010). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. *Revista DYNA*, 78(165): 18-27. ISSN electrónico 2346-2183.
- Davis, G. [George Davis]. (2018 agosto 19). Proceso Bayer - obtención de alúmina pura a partir de la Bauxita. [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=FMvClluKd4E>
- Departamento administrativo para la prosperidad social. (2018). *Guía buenas prácticas ambientales*. Recuperado de <https://www.prosperidadsocial.gov.co/ctc/Documentos%20compartidos/Guia-Buenas-Practicas-Ambientales-ProsperidadSocial-Dic4-2018.pdf>
- ERAZO, A. (2011). *Evaluación del comportamiento inicial del pino (pinus radiata) mediante la aplicación de retenedores de agua en tanlagua*. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte, San Antonio de pichincha, Ecuador.

- Fernández, A. (30 de Noviembre 2009). Para qué sirve reciclar aluminio. *Ecoticias.com*. Recuperado de <https://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/20179/MEdio-ambiente-energias-renovables-verdes-reciclaje-Para-que-sirve-reciclar-aluminio>
- Flores, J., y López, F. (Julio de 2004). Estudio de la eliminación de flúor del agua potable utilizando materiales adsorbentes. *Congreso Internacional Conjunto Cancún 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR/International Joint Meeting Cancún 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR XV Congreso Anual de la SNM y XXII Reunión Anual de la SMSR/XV SNM Annual Meeting and XXII SMSR Annual Meeting Nuevos métodos de tratamiento de agua*. Cancún, México.
- Ghorai, S., & Pant, K. K. (2005). Equilibrium, kinetics and breakthrough studies for adsorption of fluoride on activated alumina. *Separation and Purification Technology*, 42(3), 265-271. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.09.001>
- Gobernación del Huila. (2008). *Guía de fluorosis dental – Normas técnicas de fluorosis dental*. Recuperado de <http://huila.gov.co/>
- Hach Company. (2000). *Manual de análisis de aguas. Procedimientos fotométricos, procedimientos de titulación, procedimientos microbiológicos*. 2 ed. Loveland, Colorado, EE.UU. 220 p.
- Hernández, I., Gonzales, R., Arriaga, M., Aranda, J., y Barra, G. (2013). Clarificación de agua del arroyo el Hueleque de Poza Rica, Ver., utilizando cal, sulfato de aluminio e hidroxidocloruro de aluminio. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 9 (1): 1-10p. Recuperado de <http://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/205>
- Hernández, R. (2016). *Estudio del comportamiento del carbón activo en la adsorción de fluoruro procedente de aguas con concentraciones elevadas* (tesis de Pregrado). Universidad de la Laguna, Tenerife, España
- Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (2013). *Prácticas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado. Practica N° 1 características físicas*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ciudad de México, México. Recuperado de http://dicyg.fi-185c.unam.mx:8080/labsanitaria/documentos/01_AAPyA_1.pdf.
- Londoño, A. (2012). *Línea de profundización I: Ambiental. Fundamentos sobre química ambiental. Capítulo I el agua*. Universidad nacional de Colombia sede Manizales (UNAL). Manizales, Colombia. Recuperado de http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4090020/files/pdf/cap_1+pdf.
- Lubkowska A., Zyluk B., Chlubek. D. (2002). Interactions between fluoride and aluminum. *Revista Fluoride*. 2, (35): 73-77p.
- Mayorca, J. y Quesada, J. (2012). *La electrocoagulación, un estudio de caso para el tratamiento del agua de la bocatoma antigua del río las ceibas de Neiva*. (Tesis pregrado): Universidad Surcolombiana. Facultad de educación, Neiva, Colombia.

- Merck, (2016), Spectroquant test en cubetas fluoruros. Darmstadt, Alemania. Folleto.
- Ministerio de la Protección Social. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Resolución número 2115*. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf
- Mora, J., Járay, P., Vatai, G., y Bekassy, E. (2004). Eliminación de sal y metanol del agua residual industrial por ósmosis inversa. *Tecnología en Marcha*, 17(1), 83-110
- Murillo, D. (2011). *Análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada*. (Tesis de Pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira. Escuela de Tecnologías, Pereira, Colombia.
- Naciones Unidas, (2019). Departamento de Información Pública, *Creciendo a un ritmo menor, se espera que la población mundial alcanzará 9.700 millones en 2050 y un máximo de casi 11.000 millones alrededor de 2100: Informe de la ONU*. NY/100117. Recuperado de https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_PressRelease_ES.pdf
- Ordoñez, J. (2011). Cartilla técnica: aguas subterráneas-acuíferos. *Foro peruano para el agua*. Lima, Perú. Recuperado de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf
- Pérez, J. (2010). *Caracterización de la calidad del agua en la planta de tratamiento de agua potable y en la red de distribución de la ciudad de Yopal*. (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Puentes, J. C. (07 de Octubre de 2015). Problema en El Juncal por alta concentración de flúor en el agua. *Opanoticias*, pp. 1.
- Quinsa. (2017). Análisis de materia prima bauxita y óxido de aluminio. Elaborado por Fabio Morales. ITC-001 versión 7.
- Quiza, J., y Rojas, F. (2013). *Estudios de floculación para el reemplazo del sulfato de aluminio granulado tipo b como coagulante en la potabilización de aguas de la planta de tratamiento el Jardín de la ciudad de Neiva*. (Tesis de pregrado). Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia.
- Ramos, M. (2017). *Concentración del flúor en la orina de los niños de 6 a 12 años que presentan fluorosis dental severa en el centro poblado el Juncal, Municipio de Palermo Huila*. (Tesis de pregrado). Universidad Antonio Nariño, Neiva, Colombia.
- Rey, C. (2006). *Internalización de los costes ambientales generados por el uso del agua a través de instrumentos fiscales. aplicación a la comunidad foral de navarra* (tesis de Doctorado). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

- Salazar, C. (2016). *Adsorción de fluoruro por alúmina activada* (tesis de Pregrado). Universidad de la Laguna, Tenerife, España.
- Servicios de aguas de misiones s.a. (2008). *Proceso de potabilización del agua*. Posadas, Argentina. Recuperado de [http://www.elaguapotable.com/Proceso%20potabilizaci%C3%B3n\(Sansa\).pdf](http://www.elaguapotable.com/Proceso%20potabilizaci%C3%B3n(Sansa).pdf).
- Secretaria de planeación e infraestructura. (2012). *Reformulación plan básico de ordenamiento territorial - PBOT*. Recuperado de <https://cam.gov.co/component/phocadownload/category/250-cartograf%C3%ADa.html?download=2866:centro-poblado-juncal>.
- Silva, E., Villareal, M., Cárdenas, O., Cristancho, C., Murillo, C., Salgado, M. y Nava, G. (2015). Inspección preliminar de algunas características de toxicidad en el agua potable domiciliaria, Bogotá y Soacha, 2012. *Revista Biomédica*, 35(2), 152-166p.
- Supelco, (2019). *Spectroquant nova 60 modo de empleo*. Darmstadt, Alemania. Recuperado de www.merckmillipore.com > WFS > pt_BR > BRL > ShowDocument-File.
- Teutli, E. (2014). *Estudio comparativo de adsorbentes para la remoción de iones fluoruro del agua de uso y consumo en México*. (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Trejo V. y Hernández M. (2004). Riesgos a la salud por presencia del aluminio en el agua potable. *Revista Conciencia Tecnológica*, (25). 3p. ISSN: 1405-5597. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=944/94402508>
- Valencia Ríos, J. S., & Castellar Ortega, G. C. (2013). Predicción de las curvas de ruptura para la remoción de plomo (II) en disolución acuosa sobre carbón activado en una columna empacada. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (66),141-158. ISSN: 0120-6230. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=430/43027041011>
- Valenzuela, L., Ramírez-Hernández, J., Sol, J. A., & Reyes, J. A. (2011). Alternativas para la Eliminación Doméstica de Fluor en el Agua de Consumo Humano. *Información tecnológica*, 22(2), 23-32. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642011000200004>
- Vázquez, O. (1994). *Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales*. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de nuevo león, Monterrey, México.
- Villavicencio, J. (2016). *Obtención de alúmina activada y su aplicación como soporte de catalizador*. (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.