



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS,
ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL**

POSGRADO

MAESTRÍA EN QUÍMICA COHORTE MARZO 2019

Tema:

“EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE FLUORURO DE AGUA NATURAL MEDIANTE UN LECHO FLUIDIZADO DE HIDROXIAPATITA DE CALCIO”

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado académico de Magister en Química mención Química Física

Modalidad de titulación proyecto de desarrollo

Autor: Ingeniero, Hugo Marcelo Tirado Poveda

Director: Ingeniero, Manolo Alexander Córdova Suárez, Mg.

Ambato- Ecuador

2021

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

A la Unidad de Titulación/ Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por la Ing. Elsa Pilar Urrutia, Mg. e integrado por los señores: Quím. Lander Vinicio Pérez Aldás, Mg. & el Ing. Julio César Sosa Cárdenas, Mg. Designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el trabajo de Titulación con el tema: “Evaluación de la cinética de adsorción de fluoruro de agua natural mediante un lecho fluidizado de hidroxiapatita de calcio”, elaborado y presentado por el Ing. Hugo Marcelo Tirado Poveda, para optar el Grado Académico de Magister en Química mención Química Física; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

.....

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal de Defensa

.....

Quím. Lander Vinicio Pérez Aldás, Mg.

Miembro del Tribunal de Defensa

.....

Ing. Julio César Sosa Cárdenas, Mg.

Miembro del Tribunal de Defensa

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el trabajo de titulación presentado con el tema: “Evaluación de la cinética de adsorción de fluoruro de agua natural mediante un lecho fluidizado de hidroxiapatita de calcio”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Hugo Marcelo Tirado Poveda, autor bajo la dirección de: Ing. Mano Alexander Córdova Suárez, Mg, director del trabajo de investigación; y el patrimonio intelectual pertenece a la Universidad Técnica de Ambato.

.....

Ing. Hugo Marcelo Tirado Poveda

AUTOR

.....

Ing. Manolo Alexander Córdova Suárez, Mg.

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el trabajo de titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo mis derechos de mi trabajo de titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

.....

Ing. Hugo Marcelo Tirado Poveda

180462906-9

ÍNDICE GENERAL

Contenido

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
AGRADECIMIENTO	x
DEDICATORIA	xi
RESUMEN EJECUTIVO	xii
EXECUTIVE SUMMARY.....	xiii
1.CAPITULO	I
.....	1
1.1 Introducción	1
1.2Justificación.....	3
2. CAPITULO II	5
2.1Estado del arte	5
2.1.1 Afecciones del exceso de concentración de flúor en agua.....	5
2.1.2 Fuentes de contaminación de flúor	6
2.1.3 Ubicación geográfica de estudio	6
2.1.4 Determinación de parámetros de control para calidad de agua natural de acuerdo a la normativa vigente	7
2.1.4.1 Métodos de análisis.....	7
2.1.5 Desarrollo de lecho fluidizado	8
2.1.5.1Diseño de lecho fluidizado	9
2.1.6 Propiedades de la Hidroxiapatita de Calcio como material filtrante.....	9
2.1.7 Cinética de Adsorción de Fluoruro.	10
2.2 Objetivos	11
2.2.1 Objetivo General	11
2.2.2 Objetivos Específicos.....	11

3. CAPITULO III.....	12
3.1 Metodología	12
Recolección y caracterización del agua cruda para las pruebas de reducción de concentración de fluoruros.....	12
3.1.1 Dimensionamiento e instalación del lecho fluidizado con Hidroxiapatita de Calcio (CMA).	13
3.1.2 Análisis de la cinética de adsorción de fluoruro en el lecho fluidizado.....	14
3.2 Tipo de Investigación.....	14
3.2.1 De Campo	14
3.2.2 Experimental	15
3.2.3 Enfoque	15
3.3. Hipótesis.....	16
3.3.1 Hipótesis Nula.....	16
3.3.2 Hipótesis Alternativa.....	16
3.4 Población y Muestra	16
3.5 Descripción de Instrumentos.....	17
3.6 Descripción y Operacionalización de variables	18
3.6.1 Variable independiente	18
3.6.2 Variable dependiente.....	18
3.7 Procedimientos para la recolección de información	21
3.8 Procedimientos para el análisis e interpretación de resultados	22
3.8.1 Determinación de las concentraciones de fluoruro del adsorbato y adsorbente.	22
3.8.2 Determinación del pH (Potencial Hidrógeno) en muestras.....	22
3.8.3 Análisis del Diseño experimental 2^k	23
3.8.4 Ajuste de la cinética de adsorción al modelo de Langmuir.	23
3.9 Aspectos éticos	24
4. CAPITULO IV	26
4.1 Resultados	26
4.1.2. Caracterización del agua natural en función de la normativa ambiental vigente.....	26

4.1.3 Determinación de la cinética de Adsorción de Fluoruro sobre Lecho con Hidroxiapatita de calcio.	27
4.1.3. Detalle de los valores de pH en función de los ensayos de cinética de adsorción.	30
4.1.4. Análisis de Diseño Experimental factorial 2 a la k=3.	32
4.1.5 Ajuste al modelo de Isoterma de Langmuir y determinación de parámetros de control de adsorción máxima.	35
4.2. Análisis de Resultados	38
4.2.1. Caracterización Agua Cruda proveniente de la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento de Totoras.	38
4.2.2. Cinética de Adsorción de Fluoruro según el diseño experimental 2 a la k=3.	39
5.CAPÍTULO	V
5.1 Conclusiones	45
5.2 Recomendaciones.....	46
6.BIBLIOGRAFÍA	47
7.ANEXOS	52
Anexo 1. Legislación Ambiental Vigente.....	52
Anexo 2. Análisis de Caracterización Agua Natural	53
Anexo 3. Ficha Técnica Hidroxiapatita de Calcio Comercial.....	56
Anexo 4. Ficha Técnica Lecho Profundo 9"x48"	57
Anexo 5. Ficha Técnica Grava Homogénea Lavada.....	58
Anexo 6. Ficha Válvula manual para filtro Purago.....	59
Anexo 7. Planta de Tratamiento JAPS Totoras.....	59
Anexo 8. Lecho Fluidizado con Hidroxiapatita de Calcio.....	60
Anexo 9. Ensayos experimentales de muestras antes y después del Tratamiento	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Caracterización del Agua Natural JAPS Totoras	13
Tabla 2. Detalle Diseño Experimental.....	15
Tabla 3 Determinación del número de muestras para Análisis.....	16
Tabla 4 Caracterización de Agua Natural JAPS Totoras	26
Tabla 5 Promedio de las Mediciones de Fluoruro en cada Experimento	27
Tabla 6 Concentraciones de Adsorbato en el Adsorbente.....	28
Tabla 7 Eficiencia de Remoción de Fluoruro aplicando HAP	30
Tabla 8. Promedio de las Mediciones de pH en cada Experimento.....	31
Tabla 9 Análisis de Varianza para diseño experimental 2 a la k=3	32
Tabla 10 Optimización de Respuesta Experimental.....	33
Tabla 11 Parámetros de medición al Ajuste de Isotherma de Langmuir	35
Tabla 12 Análisis de costos actuales del mercado para tratamiento de aguas	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Localización Planta de Tratamiento de Agua Potable de Totoras	
Totoras	12
Figura 2. Cinéticas de Adsorción.....	29
Figura 3 Variación del pH durante la experimentación.....	31
Figura 4 Diagrama de Pareto Estandarizado para el efecto de las variables sobre la concentración de fluoruro en agua natural	33
Figura 5 Efectos de las variables sobre la concentración final de fluoruro..	34
Figura 6 Gráfica de superficie de repuesta entre factores.	34
Figura 7 Variación del pH en función de la Concentración en cada carga de HAP	36
Figura 8 Cinética de Adsorción de Flúor en mg/kg	37
Figura 9 Isoterma de Adsorción de Langmuir	37

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme la vida, la salud y el conocimiento para poder ejecutar este proyecto.

Un Agradecimiento muy especial a mis padres por la confianza y el apoyo en este proceso que no se hubiese concretado de no ser por su presencia en cada etapa de mi vida.

A Lorena Vargas Velastegui por su apoyo incondicional, por estar a mi lado como guía y luz en el camino y haber aportado en este proyecto con su asesoría profesional.

A mi hermano Marco Tirado y su empresa Osmopurif Water por haber confiado en el proyecto y proveer de los insumos necesarios para la ejecución del mismo.

A la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento de Totoras Administración 2019-2020 quienes confiaron en el conocimiento y permitieron la ejecución del proyecto en sus instalaciones.

A la EP-EMAPA-A por haber facilitado sus instalaciones de laboratorio para la obtención de resultados experimentales del presente proyecto.

A la Ingeniera Cecilia Carpio por su ayuda y experiencia sin duda gotas de conocimiento que ayudaron a concretar el proyecto.

Al Ingeniero Manolo Córdova por aceptar la tutela del presente proyecto ya haber sido parte del mismo bajo su dirección.

A la Universidad Técnica de Ambato por permitir la oportunidad de crecimiento profesional a través de este programa de maestría.

DEDICATORIA

Este logro va dedicado con especial cariño para mis padres Víctor Hugo Tirado y Glenda Marcela Poveda y también lo dedico a mi carrera profesional pues nada de lo que se realiza tiene significado si no se ama lo que hace.

Con mucho afecto, Hugo Marcelo Tirado Poveda.

“El buen juicio nace de la buena inteligencia de la cual se genera la razón que da lugar a las buenas reglas las cuales son hijas de la experiencia y ésta a su vez es el común denominador de todas las ciencias y las artes”

Leonardo Da Vinci

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL

MAESTRÍA EN QUÍMICA

TEMA:

“EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE FLUORURO DE AGUA NATURAL MEDIANTE UN LECHO FLUIDIZADO DE HIDROXIAPATITA DE CALCIO”

AUTOR: Ingeniero, Hugo Marcelo Tirado Poveda

DIRECTOR: Ingeniero, Manolo Alexander Córdova Suárez, Mg.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Medio Ambiente

FECHA: 03 de mayo de 2021

RESUMEN EJECUTIVO

Se ha diseñado un lecho fluidizado con hidroxapatita de calcio (HAP) ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) para reducir la concentración de fluoruros en el agua natural del sector de Totoras donde las concentraciones de flúor en agua natural exceden en promedio los 3 mg/L F^- , a través del principio de intercambio iónico, se determinó la cinética de adsorción del flúor sobre la matriz sólida de HAP comercial siguiendo un diseño experimental 2 a la $k=3$, donde por medio del análisis de optimización de respuesta se identificó las condiciones del mejor tratamiento con un resultado de $0,83 \pm 0,02$ mg/L F^- de adsorbato en la solución, al cabo de tres días de tratamiento con una carga de HAP del 70% o 63 kg a un flujo constante de agua de 2 L/min indicando una eficiencia máxima de remoción del 75,77%, por lo cual, este tratamiento se ajustó al modelo lineal de la Isoterma de Langmuir para poder realizar un escalado de proceso a caudales mayores, para lo cual se obtuvieron los parámetros lineales del modelo de Langmuir con valores de $q_{\text{máx}}$ de 1,15 mg de adsorbato pro cada kg de adsorbente para un factor de unión K de 2,76 Litros de solución por cada kilogramo de adsorbente.

Descriptor: Adsorbato, adsorbente, eficiencia, fluoruros, hidroxapatita de calcio, isoterma, lecho fluidizado, Langmuir, tratamiento.

TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO
FACULTY OF SYSTEMS, ELECTRONIC AND INDUSTRIAL
ENGINEERING

MASTER'S DEGREE IN CHEMISTRY

THEME:

"EVALUATION OF THE KINETICS OF ADSORPTION OF FLUORIDE FROM NATURAL WATER BY MEANS OF A FLUIDIZED BED OF CALCIUM HYDROXYAPATITE".

AUTHOR: Engineer, Hugo Marcelo Tirado Poveda

DIRECTOR: Engineer, Manolo Alexander Córdova Suárez, Mg.

LINE OF RESEARCH: Environment

DATE: May 03, 2021

EXECUTIVE SUMMARY

A fluidized bed with calcium hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) has been designed to reduce the concentration of fluorides in the natural water of the Totoras sector where fluoride concentrations in natural water exceed on average 3 mg/L F^- , through the principle of ion exchange, the kinetics of fluoride adsorption on the solid matrix of commercial PAH was determined following an experimental design 2 at $k=3$, where by means of the response optimization analysis, the best treatment conditions were identified with a result of $0,83 \pm 0,02$ mg/L F^- of adsorbate in solution, after three days of treatment with a PAH load of 70% or 63 kg at a constant water flow of 2 L/min, indicating a maximum removal efficiency of 75.77%, for which this treatment was adjusted to the linear model of the Langmuir Isotherm to be able to scale up the process to higher flow rates, For this purpose, the linear parameters of the Langmuir model were obtained with values of q_{max} of 1.15 mg of adsorbate per kg of adsorbent for a binding factor K of 2,76 liters of solution per kilogram of adsorbent.

Keywords: Adsorbate, adsorbent, efficiency, fluorides, calcium hydroxyapatite, isotherm, fluidized bed, Langmuir, treatm

1. CAPITULO I

1.1 Introducción

Durante años, varios países del mundo han dado importancia a recursos naturales como el oro, petróleo, etc. Sin embargo, en la actualidad el recurso agua se ha considerado un tema de debate entre gobiernos mundiales debido a su escasez, ya que globalmente cerca del 3 % representa al agua dulce y menos del 1% se puede aprovechar para el uso y consumo, frente a esta realidad el cuidado y mejoramiento de la calidad del agua se ha convertido en un tema de alto impacto e importancia ya que debido a la industrialización, geología y cambio climático, la contaminación de fuentes naturales del agua afectarían a cerca del 48% de la población mundial pudiendo causar conflictos de alta escala por la posesión del líquido vital [1].

Dentro de la matriz agua existen elementos considerados benéficos para la salud humana y animal, pero no siempre se encuentran en las concentraciones adecuadas lo cual resulta perjudicial causando un problema para el aprovechamiento del agua. Por ejemplo, el flúor ha sido históricamente utilizado para combatir la caries dental a nivel mundial siempre y cuando las concentraciones del mismo no excedan el límite de 1,5 mg/L establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [2], dicho criterio se aplica a la concentración del anión fluoruro en el agua de consumo.

A niveles elevados de flúor en agua se produce la denominada fluorosis dental, una afección que es endémica en al menos 25 países del mundo en concentraciones que resultan tóxicas afectando la psicomotricidad de las personas [3]. En un estudio realizado en Shaanxi- China se evaluó la afección de la concentración de 10 mg/L de flúor en niños de 7 a 8 años de edad indicando la incidencia del 80% de fluorosis dental crónica [4]. En América Latina, México es uno de los países con alto índice de flúor en

agua, en regiones como Tenextepango - Morelos los niveles de flúor oscilan de 0,5 mg/L a 1,9 mg/L en aguas subterráneas y de manantiales, el origen de esta problemática se debe al relieve rocoso de dichos sectores, los cuales son ricos en fluorita [5].

Las alternativas para el tratamiento de aniones en agua suponen el uso de tecnologías costosas y que requieren alto consumo energético y de personal capacitado para su manejo, sin embargo, los tratamientos comúnmente aplicados en aguas naturales implican el uso de alúmina activada y zeolitas modificadas. La aplicación de zeolita (Clinoptilolita) acidificada para remover una concentración de 7,8 mg/L de flúor en agua resultó en la disminución de aproximadamente el 80 % del anión en 48 horas de exposición al medio adsorbente lo cual lo convierte en una alternativa viable para un tratamiento convencional según lo establecido en [2].

El método de precipitación química es un tratamiento convencional que implica el uso de sulfato de aluminio y polímero aniónico para la remoción de aniones en agua. Piñón y colaboradores en 2002 obtuvieron una remoción de flúor en agua natural del 77% [6], sin embargo, el costo del método es elevado y de alto riesgo ya que requiere cargas periódicas de químicos y regulación de pH para que estos ejerzan la acción deseada.

Actualmente la aplicación de lechos filtrantes se ha convertido en la tendencia en el tratamiento de aguas. Coreño y colaboradores [7] propusieron el uso de la hidroxiapatita nanoparticulada para la adsorción de flúor y arsénico en soluciones acuosas, los resultados obtenidos en columnas de filtración con caudales bajos de tratamiento indicaron la reducción total del anión fluoruro, por lo cual el objetivo de la presente investigación se fundamenta en la aplicación de la hidroxiapatita de calcio comercial como material adsorbente de flúor en condiciones reales de tratamiento de agua natural de concentraciones superiores a 3 mg/L.

1.2 Justificación

La concentración del anión Fluoruro en agua natural es comúnmente baja y depende de la geografía y geología del suelo de donde surgen, en Ecuador la normativa vigente que regula la concentración máxima permitida de esta especie química es el Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental (TULSMA) [8], donde la Tabla 1 (Criterios de Calidad para Fuentes de Agua para Consumo Humano y Doméstico) indica un valor máximo permitido de 1,5 mg/L F⁻. En un estudio efectuado por la Dirección Nacional de Estomatología del Ministerio de Salud Pública del Ecuador en 1996, se evaluó la concentración de flúor en fuentes de agua de 646 comunidades urbanas y rurales del cantón Pelileo indicando una concentración promedio aproximada de 2,3 mg/L F⁻ [9], valor superior a los indicados tanto en el TULSMA:2015 como en la Norma del Agua Potable INEN 1108:2020 [10]. Actualmente la zona sur de Ambato (Picaihua, Terremoto y Totoras) evidencia exceso de Fluoruros en agua de consumo, según análisis físico químicos realizados a la fuente de agua natural de Terremoto por parte del Laboratorio de Control de Calidad de la EP-EMAPA-A en el año 2018 se registran concentraciones superiores a 3 mg/L F⁻. El flúor es un elemento que ayuda a prevenir las caries dentales, mejora la estructura mineral de los dientes y previene la adhesión de placa dental, sin embargo, el exceso de esta especie química genera la fluorosis dental, una anomalía que influye sobre el buen funcionamiento de los odontoblastos o células que forman el esmalte dental impidiendo su desarrollo de manera normal. La fluorosis esquelética es otra afección que se evidencia dado a que el flúor tiene afinidad por adherirse al calcio de los huesos, las afecciones suelen ser leves y graves dependiendo del tiempo de exposición y concentración de fluoruros ingeridos [11]. Los tratamientos para reducir o remover fluoruros del agua suponen el uso de alúmina activada, ósmosis inversa y hueso calcinado en cada caso el costo de funcionamiento y complejidad de operación representan limitantes en su ejecución, siendo la más viable el uso de hueso calcinado dado que en su estructura porosa contiene hidroxiapatita de calcio, el mineral precursor de la fluorita y el fluorapatito,

bajo el principio de intercambio iónico el flúor puede interactuar con el mineral hidroxilado intercambiando el ión OH^- con el medio acuoso, permitiendo atrapar al flúor en la estructura mineral, para eliminar el flúor fijado es necesario realizar una regeneración del mineral con hidróxido de sodio y eliminar el subproducto NaF mediante lavado del lecho filtrante [12]. Actualmente en Ecuador no existen referencias en las que este problema se haya resuelto aplicando el uso de tecnologías más que a nivel doméstico e industrial con ósmosis inversa sin embargo para el abastecimiento de comunidades de alta densidad poblacional el problema continúa.

El presente estudio pretende determinar la viabilidad del uso de la hidroxiapatita de calcio como una alternativa para el tratamiento de la reducción del exceso de fluoruros en matrices de agua natural.

2. CAPITULO II

2.1 Estado del arte

La investigación se centra en la importancia de la calidad del agua para consumo humano y va orientado al tratamiento sostenible para la reducción del ión fluoruro que se encuentra en concentraciones que exceden el límite máximo permitido de 1,5 mg/L según la Organización Mundial de la Salud (OMS) [13]. En la publicación del VII Foro Mundial del Agua se evidencia que en Latinoamérica el 53% del recurso agua provienen de fuentes naturales y el 23% no cuentan con infraestructura e ingeniería para el tratamiento del agua [14]. En el presente capítulo se abordarán los fundamentos técnicos y teóricos que permitan profundizar en la aplicación de los principios de la cinética química aplicando hidroxiapatita de calcio como material adsorbente para poder ofrecer la alternativa viable al exceso de flúor contenido en agua natural.

2.1.1 Afecciones del exceso de concentración de flúor en agua

El flúor de símbolo químico F es un metaloide del grupo halógeno presente en estado puro en forma de gas débilmente amarillo, en estado sólido asociado a minerales y en agua en forma de fluoruros y se encuentra distribuido ampliamente en la naturaleza. En la década de 1930 se prestó atención al flúor por su actividad remineralizante por medio de la interacción con los fosfatos, el calcio de las piezas dentales también actúa a nivel de superficies cristalinas para combatir la caries dental ya que potencia la resistencia a las sustancias ácidas, sin embargo, en la actualidad se conoce que altas concentraciones del anión fluoruro causa enfermedades como la fluorosis dental y esquelética, siendo la primera la afección más común a nivel mundial, la ingesta de agua con elevada concentración del analito en cuestión durante los primeros cuatro años de desarrollo produce evidencias más notorias ya que presenta despigmentación del esmalte dental con la aparición de manchas amarillas y la degradación cálcica de la dentadura [15]. En Ecuador, un estudio estadístico realizado a individuos de 6 a 15

años en el sector de Tumbaco indicó que 77% de la población presentaba fluorosis dental con un grado de severidad media correspondiente al 32 % del total de la población y una severidad grave del 9 % debido al tiempo de residencia de los individuos en el sector de estudio [16]. La ingesta diaria recomendada por la OMS está en el rango de 0,7 mg/L a 1,2 mg/L, es decir, que el consumo de agua con concentraciones mayores a lo ya detallado durante largos períodos de tiempo provoca la afección dental y por lo tanto aporta a la rápida degradación de la estructura de los dientes siendo la población más afectada los individuos entre 4 a 10 años de vida.

2.1.2 Fuentes de contaminación de flúor

El flúor se encuentra en aguas subterráneas en forma de molécula en concentraciones variables de acuerdo a la geografía propia de cada sector. Por lo tanto, este metaloide está asociado a las rocas que se encuentran en contacto con el agua [5]. La fuerza iónica del flúor influye sobre la solubilidad del estado mineral y a través de intercambio iónico se aporta el ión fluoruro al agua en lugar de los grupos hidroxilo (OH^-) de manera lenta [17]. Los minerales más comunes que liberan flúor en medio acuoso son la fluorita (CaF_2) y el fluoroapatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_3)\text{F}$), entre otros. La fluorita si bien es la causante de incrementar la concentración de flúor en matrices acuosas resulta ser un material de importancia en la industria, siendo China con el 66% el mayor productor a nivel mundial, seguido de México con el 11% de producción del mineral [18].

2.1.3 Ubicación geográfica de estudio

En el año 1995 el Ministerio de Salud Pública y la Dirección de Estomatología realizaron un programa para prevenir el consumo excesivo de flúor en agua, como producto de la investigación se determinó, que en Tungurahua los casos de fluorosis dental se encontraban fuertemente identificados en comunidades de Salasaca, Pelileo y la zona sur de la ciudad de Ambato [9]. La zona sur de Ambato está constituida por las parroquias de Totoras, Huachi Grande, Huachi Chico, Terremoto, Picahihua las mismas que se encuentran en promedio a 2 888 metros sobre el nivel del

mar (msm) en las coordenadas 1°20'25" S 78°37'38" N [19]. El nivel de flúor en las zonas antes mencionadas es elevado, siendo la parroquia Totoras el sector con mayor concentración de flúor en agua natural con un promedio de 2,54 mg/L F⁻ [20]. Actualmente la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento de Totoras (JAAPST) mantiene un control de análisis de este parámetro, el cual excede los 3 mg/L en agua proveniente de dos vertientes ubicadas a 15 Km de la parroquia.

2.1.4 Determinación de parámetros de control para calidad de agua natural de acuerdo a la normativa vigente

El control de la calidad del agua natural y agua potable está asociada a normativas vigentes en el país y que son reguladas por instituciones públicas con la finalidad de asegurar calidad e inocuidad a los usuarios del líquido vital, en Tungurahua la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) es el organismo público encargado de concesionar los caudales de agua a las juntas administradores que desean aprovechar las fuentes de agua dulce, no sin antes cumplir con lo establecido en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente [8], específicamente se basan en la Tabla 1. Criterios de Calidad de Fuentes de Agua para Consumo Humano y Doméstico. La tabla en mención se constituye de 21 parámetros entre Físico-Químicos y Microbiológicos, sin embargo, no siempre es necesario evaluar el 100 % de los parámetros, el criterio de análisis está ligado a la ubicación geográfica de las fuentes de agua y a la presencia de industrias en la misma zona, por lo tanto, se consideran parámetros de relevancia aquellos que aportan mayor información analítica como los siguientes: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Potencial Hidrógeno (pH), Turbidez, Color Real, Hierro y Fluoruros.

2.1.4.1 Métodos de análisis

El análisis de fluoruros permite desarrollar el diseño y operación de unidades de tratamiento para remoción de este anión cuando se encuentra en cantidades excesivas, esta especie química es de baja solubilidad por lo cual los casos de concentraciones de 10 mg/L hasta 50 mg/L suele ser

ocasional y generalmente se asocia a los minerales subterráneos. En el agua se encuentran asociados a sales como Fluoruro de sodio (NaF), Silicofluoruro de sodio (Na_2SiF_6) y Ácido fluorosilícico (H_2SiF_6). Los procedimientos analíticos para la cuantificación de fluoruros generalmente son potenciométricos y colorimétricos, el primer caso supone el uso de un electrodo especial y estándares especiales para la construcción de una curva de calibración para el análisis del ión fluoruro, mientras que para el método colorimétrico se utiliza la espectrofotometría a partir de la construcción de una curva de calibración que comprenda el rango de estudio aproximado. El método SPANDS está basado en la reacción instantánea entre los fluoruros presentes y un compuesto de circonio-ácido [21]. El método HACH 8029 normalizado según el Standard Methods 4500F-B,D; una porción del reactivo se disocia en un complejo incoloro aniónico (ZrF_6^-), a razón de que la concentración de fluoruros es mayor, el color que se produce es de menor intensidad, característicamente varía en un tono rojizo oscuro hasta volverse más claro, satisfaciendo la ley de Beer pero de manera inversa, utilizando como blanco agua desionizada el color se torna en un tono más fuerte al de la muestra con el analito a una longitud de onda de 580 nm, el resultado que se obtiene registra el valor directamente en mg/L y absorbancia [22].

2.1.5 Desarrollo de lecho fluidizado

El desarrollo de lechos fluidizados es ampliamente utilizado para diferentes aplicaciones industriales en el tratamiento de residuos, purificación y como reactores biológicos. El objetivo de desarrollar un lecho fluidizado proviene de la acción del material adsorbente, en este sentido se pueden producir dos tipos de fenómenos como la fisisorción, la cual se caracteriza por la acción de las fuerzas intermoleculares y las atracciones electrostáticas entre el material y la solución acuosa, por lo tanto, las moléculas no se adsorben en sitios específicos lo que permite que interactúen libremente sobre la superficie del adsorbente y la quimisorción que se caracteriza por la especificidad para formar complejos superficiales ente el adsorbente y las moléculas del adsorbato este proceso suele ser generalmente irreversible.

Para cada caso la naturaleza y composición del material definirá la vía de acción del lecho fluidizado [23].

Los lechos fluidizados pueden ser continuos o tipo Bach (lotes), en cualquier caso, se considera fluidizado cuando el flujo de sustancia que ingresa cubre o circula a través del medio incluido en una columna dimensionada de manera escalable y de acuerdo a los criterios físicos y químicos de la sustancia de tratamiento. Factores como la superficie del material, porosidad, solubilidad, velocidad mínima de fluidización, cantidad de material adsorbente son considerados básicos para el desarrollo de este tipo de sistemas [24].

2.1.5.1 Diseño de lecho fluidizado

Para el diseño de lecho fluidizado se pueden utilizar sistemas hidráulicos estandarizados y escalables como es el caso de los lechos filtrantes constituidos en fibra de vidrio poly glass fabricados con carcasa interior de polietileno de alta densidad con entrada roscada de 2 pulgadas hasta 5 pulgadas con capacidad de operación máxima a una presión de 150 PSI y capacidad de 1,16 pies cúbicos cuyo rendimiento en flujo permite un máximo de 7,93 litros por minuto en un lecho de 8 pulgadas por 44 pulgadas de dimensiones cilíndricas, su acoplamiento viene dado por una válvula manual para poder realizar regeneraciones o mantenimiento del material adsorbente, el volumen del material adsorbente varía de acuerdo a la necesidad de tratamiento y generalmente se asocia al parámetro que se desea eliminar o reducir [25].

2.1.6 Propiedades de la Hidroxiapatita de Calcio como material filtrante

La hidroxiapatita de calcio (HA) de fórmula química $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, es un compuesto fosfatado con grupos hidroxilo (OH^-), cuya característica principal es la capacidad de intercambio de iones y aniones. Dada su estructura, ésta interactúa ampliamente en la remoción de aniones como el flúor (F^-). Termodinámicamente la característica de la relación Ca/P permite

que este compuesto mantenga una estabilidad en medios de pH débilmente ácidos, neutros y básicos [26].

El fosfato cálcico como componente en huesos obtiene su estructura final mineral inorgánica como (HA) al ser sometida a calcinación originando el compuesto que se ordena en una matriz de grupos PO_4^{3-} unidos por iones Ca^{2+} seis de estos iones forman dos triángulos equiláteros con un centro de rotación helicoidal que forma planos verticales, por lo tanto, los grupos OH^- se ubican en las cavidades columnares que se forman en el interior de los triángulos. Esta estructura del estado sólido hexagonal permite la recepción de especies químicas de carga negativa [27]. La (HA) presenta un color blanquecino y al ser un sólido cristalino posee un punto de fusión de 1100°C aproximadamente, relativamente más denso que el agua sus valores están entre $3,05\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ a $3,15\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$, es insoluble en agua debido a los grupos fosfatos que generan fuertes interacciones electrostáticas [28].

2.1.7 Cinética de Adsorción de Fluoruro.

Para el estudio de evaluación de remoción de fluoruro en agua natural es necesario la aplicación de la cinética química. En un estudio realizado por Sing y colaboradores en el 2019, la adsorción de fluoruro del agua a través de una columna con hidroxiapatita no calcinada sintética se evaluó utilizando un modelo de concentración en función del tiempo tomando en consideración el efecto del pH en la experimentación [29]. La evaluación de la capacidad de adsorción del material se lo puede realizar controlando condiciones como la temperatura y el pH y evaluar la capacidad de retención a velocidades de flujo (L/min), variables evaluadas con la finalidad de estimar máximos y mínimos de retención, así como tiempos de regeneración del material filtrante, en este caso la variable respuesta viene dada en la concentración final de flúor expresado en mg/L, obtenida luego de aplicar el tratamiento [30]. La determinación de la cinética de adsorción, se procesa a través de análisis estadísticos aplicando diseños experimentales que permiten evaluar la influencia de diferentes variables sobre la respuesta experimental de interés. HINDROP en 2016 propuso su ficha técnica

aplicando zeolitas modificadas con nanotecnología para reducción de la concentración de flúor en agua y lo realizó a través del análisis de concentraciones crecientes y velocidades de flujo variables obteniendo comportamientos exponenciales. Casos similares como el uso de químicos para electrocoagulación también requieren de análisis cinéticos para identificar la eficiencia de remoción de especies químicas utilizando los modelos cinéticos de pseudo - primer orden de reacción a través de la relación de variables como pH, tiempos de flujo e intervalos de tiempos de tratamientos [31].

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

Evaluar la cinética de adsorción de fluoruro de agua natural mediante un lecho fluidizado de hidroxapatita de calcio.

2.2.2 Objetivos Específicos

- Efectuar la revisión bibliográfica relacionada a tratamientos para la remoción de flúor en matrices acuosas aplicando tecnologías de lechos fluidizados.
- Caracterizar el agua natural mediante análisis físico-químico en base a la normativa ambiental vigente.
- Diseñar el lecho fluidizado para el uso de hidroxapatita de calcio como material filtrante.
- Cuantificar la concentración de fluoruros en el agua después del tratamiento en función del tiempo por medio de espectrofotometría UV-VIS.

3. CAPITULO III

3.1 Metodología

Recolección y caracterización del agua cruda para las pruebas de reducción de concentración de fluoruros.

Se recolectó 1 Litro de agua cruda de la Junta de Agua Potable y Saneamiento (JAPS) de Totoras ubicada a 3 Km desde el centro de la parroquia en las coordenadas 1.322148, -78.608217, como se indica en la figura 1.

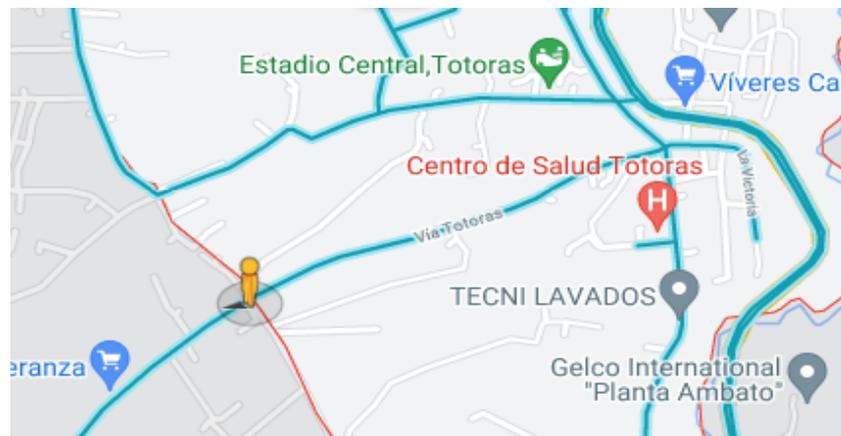


Figura 1 Localización Planta de Tratamiento de Agua Potable de Totoras

Nota: Coordenadas obtenidas de Aplicación móvil Google Maps, 2020.

Se procedió a realizar la toma de muestra según lo indicado en el Instructivo de toma de muestra de la EP-EMAPA-A, y posteriormente se entregó al laboratorio de Control de Calidad de la misma entidad para la realización de los análisis físico-químicos y microbiológicos de acuerdo al criterio detallado en el TULSMA 2015 - Tabla 1. Calidad de Agua para Consumo Humano:

Tabla 1 Caracterización del Agua Natural JAPS Totoras

Análisis Físico Químico
Arsénico
Cianuros
Color Real
Cromo Hexavalente
Demanda Química de Oxígeno
Fluoruros
Hierro
Nitratos
Nitritos
pH
Sulfatos
Turbidez
Análisis Microbiológico
Coliformes Fecales

Elaborado por: Tirado M.

3.1.1 Dimensionamiento e instalación del lecho fluidizado con Hidroxiapatita de Calcio (CMA).

Para el dimensionamiento del sistema de lecho fluidizado se definió el caudal máximo a tratar siendo este de 2LPM Y 5 LPM (Litros por Minuto) se escogieron estos valores teniendo en cuenta el caudal máximo de la planta de tratamiento que es de 1200 LPM y asumiendo los flujos de 2LPM a 5 LPM como los intervalos de consumo semanal por usuario de la JAPS de Totoras, por lo tanto, se utilizó un tanque cilíndrico de 9''x48'' en fibra de vidrio color azul con resistencia de operación hasta 150 PSI y caudal de operación máximo de 16,72 LPM (litros por minuto), según los datos del fabricante el lecho maneja un volumen de 1 pie³ por lo que fue necesario ubicar el 10 % del volumen total con una cama de grava lavada para soporte del material filtrante y se colocó el manto de filtración al 30% de HAP del volumen total y 70

% de HAP del volumen total en peso (Kg), posteriormente se adecuó una válvula manual para realizar el lavado, retrolavado, enjuague y desagüe del sistema. Además, se instaló una válvula de aguja en acero inoxidable y un flujómetro LZT modelo M-10 de 18 LPM en escala de 1 unidad para regular el paso de flujo a 2 LPM y 5 LPM. Para generar la presión necesaria para el paso del agua en el lecho fluidizado se requirió de una bomba de agua de ½ HP de potencia marca Pedrollo, la misma que se conectó a un sistema de encendido para controlar el funcionamiento del sistema. El agua cruda se recolectó mediante manguera a un tanque PVC tipo botella de 250 Litros de capacidad el mismo que se conectó directamente al bombeo para su ingreso al sistema, a la salida del tanque se recolectaron las muestras de agua tratada.

3.1.2 Análisis de la cinética de adsorción de fluoruro en el lecho fluidizado.

Para poder evaluar la cinética de adsorción del Fluoruro en agua natural se adoptó la metodología aplicada en [7]. Donde se determina la concentración de adsorbato durante cierto período de tiempo y para lo cual se seleccionó el método HACH 8029 a 580 nm que aplica el uso del reactivo SPANDS que mide la transmitancia del complejo zirconio (4^+) con el reactivo 2 (Parasulfofenilazo) 1,8-dihidroxi-3,6 naftalendisulfonato de sodio, adicional se realizó la lectura del pH para identificar la influencia del mismo durante el experimento, para una mayor veracidad de datos experimentales se realizaron mediciones por triplicado.

3.2 Tipo de Investigación

3.2.1 De Campo

Se evaluó la alternativa del uso de la Hidroxiapatita de calcio comercial (CMA) como material para la reducción de flúor en agua natural aplicando un sistema *in situ* de tratamiento a escala piloto para la Planta de

Tratamiento de Agua Potable de Totoras ubicada al sur de la ciudad de Ambato.

3.2.2 Experimental

El proyecto de investigación se fundamentó en la aplicación de un diseño factorial 2^k ($k=3$), cuya variable experimental de respuesta fue la concentración en mg/L F^- del adsorbato en la solución luego de que el flujo haya pasado por el adsorbente durante un período de tiempo, la siguiente tabla indica el detalle del diseño.

Tabla 2. Detalle Diseño Experimental

Ensayos	2^3			Variables			Respuesta
	X_1	X_2	X_3	HAP (%)	Q (L/min)	T (días)	Experimental mg/L F^-
1	-	-	-	30	2	3	Y_1
2	+	-	-	70	2	3	Y_2
3	-	+	-	30	5	3	Y_3
4	+	+	-	70	5	3	Y_4
5	-	-	+	30	2	10	Y_5
6	+	-	+	70	2	10	Y_6
7	-	+	+	30	5	10	Y_7
8	+	+	+	70	5	10	Y_8

Nota: X_1 representa la cantidad de material adsorbente Hidroxiapatita de calcio (HAP), X_2 representa el caudal de tratamiento (Q) a experimentar, X_3 representa el tiempo de tratamiento (T) en días, cada variable está sujeta a un límite superior y uno inferior. La respuesta experimental denotada con (Y) viene expresada en unidades de concentración (mg/L F^-).

Elaborado por: Tirado M. 2020

3.2.3 Enfoque

A partir de un enfoque Cuantitativo se verificó la eficacia del experimento a través de la medición de la variable respuesta por medio de la cinética de adsorción midiendo por triplicado la concentración en mg/L F^- en función

del tiempo, y corroborando su veracidad mediante el análisis ANOVA con el uso del software Statgraphics Centurion [32].

3.3.Hipótesis

3.3.1 Hipótesis Nula

El uso de lecho fluidizado de hidroxapatita de calcio no genera una cinética de adsorción de fluoruro de agua natural.

3.3.2 Hipótesis Alternativa

El uso de lecho fluidizado de hidroxapatita de calcio genera una cinética de adsorción de fluoruro de agua natural.

3.4 Población y Muestra

A partir del diseño experimental factorial 2^k se definieron las cantidades de muestras en un sistema de lecho fluidizado en acción continua, por lo tanto, para obtener un resultado representativo, se monitoreó el funcionamiento durante 3 y 10 días para obtener una tendencia del rendimiento del sistema, a partir de dichos datos se determinaron los mejores tratamientos para su evaluación con el ajuste al modelo de isoterma de Langmuir. En la siguiente tabla se detallan el número y cantidad de muestras requeridas para la investigación:

Tabla 3 Determinación del número de muestras para Análisis

Modelos experimentales	Número de Muestras para mediciones de Fluoruro en mg/L
Concentraciones obtenidas al 30% HAP y 2 L/min	21
Concentraciones obtenidas al 70% HAP y 2 L/min	21
Concentraciones obtenidas al 30% HAP y 5 L/min	21

Concentraciones obtenidas al 30% HAP y 5 L/min	21
Concentraciones necesarias para ajuste a Isotherma de Langmuir	6

Nota: De acuerdo a lo establecido en la columna izquierda se detallan las condiciones de los experimentos y en la columna derecha el número de muestras requeridos para cada uno, es necesario recalcar que cada muestra tiene tres mediciones experimentales, y el volumen recolectado por cada uno fue de 1 L.

Elaborado por: Tirado M. 2020.

3.5 Descripción de Instrumentos

A continuación se detallan las listas de instrumentos, materiales y reactivos utilizados en la presente investigación.

- **Diseño de Lecho Fluidizado:** Se utilizó un tanque cilíndrico marca Pentair Structural Poly Glass 9" x 48" - 2,5" T, base estándar Azul, fibra de vidrio resistente; Válvula manual para filtro marca Purago para conexiones 1", base 2,5", flujo de servicio 17,6 GPM, Difusor superior e inferior con tubo de recolección marca LASCO de 1"; 9 Sacos de 25 Kg Grava Homogénea Canto Rodado 1" ½" x ¾" (1,8 cm a 3,5 cm); 8 sacos de 50 Kg de Hidroxiapatita de Calcio (HAP) Marca Lyphar 99% pureza, Flujómetro LZT de capacidad 18 litros por minuto (LPM) o 5 galones por minuto (GPM), válvula de aguja acabado en acero inoxidable 316 NTP, bomba periférica de agua ½ Hp de potencia y frecuencia de 50 Hz marca Pietro in/out 1", tanque PVC plastigama tipo botella de 250 litros (L) de capacidad. Cada cantidad de HAP se pesó en una Báscula de Plataforma Electrónica Marca LOCOSC modelo LP7610 de capacidad máxima de 150Kg ± 5 Kg.
- **Cuantificación experimental:** Para la cuantificación experimental se utilizó un espectrofotómetro marca HACH modelo DR 3900, agua destilada tipo II (Conductividad menor a 1 µS/cm), reactivo SPANDS Reagent for Fluoride Cat. 444-49 marca HACH. La validez de la curva de calibración interna del equipo en el programa 190 aplicando el método HACH 8029 se realizó mediante la corrida de la solución

estándar Fluoride Standard Solution $0,2 \pm 0,02$ mg/L as F^- Cat. 40502 antes de las mediciones de estudio. Además, se monitoreó el pH de las muestras por triplicado usando un potenciómetro marca HACH modelo Sension TM + PH1.

3.6 Descripción y Operacionalización de variables

3.6.1 Variable independiente

- ✓ Lecho Fluidizado de hidroxiapatita de calcio.

3.6.2 Variable dependiente

- ✓ Cinética de adsorción de fluoruro de agua

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Ítems Básicos	Unidad de medida	Técnica Instrumento
Lecho Fluidizado de hidroxiapatita de calcio.	Los lechos fluidizados son sistemas que permiten la aplicación de operaciones como la adsorción, filtración, etc. [23]. La Hidroxiapatita de calcio (HA) es un material que debido a su estructura química que lo hace ideal para el intercambio iónico en aguas [26].	Es el sistema construido a base de estructuras estandarizadas y funcionalizado con hidroxiapatita de calcio por su capacidad de intercambio iónico y su afinidad por aniones.	Dimensiones del sistema y accesorios	Definición de caudales	¿Es el sistema Escalable?	Flujo de tratamiento en litros por minuto (L/min)	Técnica: Revisión documental Instrumentos: Especificaciones técnicas del proveedor Condiciones de campo.
			Especificaciones técnicas de la hidroxiapatita comercial	Determinación de cantidad de material depurador	¿Es el material apto para su uso en productos de consumo humano?	Porcentaje de material en base a la dimensión del lecho	Técnica: Revisión Documental. Instrumentos: Ficha Técnica del producto y del sistema

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Ítems Básicos	Unidad de medida	Técnica Instrumento
Cinética de adsorción de fluoruro de agua natural.	La cinética de adsorción se aplica para determinar la efectividad de remoción de especies químicas de una matriz específica y viene determinada por variables como concentración, pH, temperatura, etc. [30].	Es la construcción del modelo cinético definido por la concentración de adsorción de fluoruro en el material filtrante en un período de tiempo definido	Caracterización Físico-química del agua sin tratamiento. Determinación analítica de Flúor en agua tratada.	Definición de parámetros de interés. Aplicación de métodos normalizados	¿Se conoce la calidad del Agua Natural de Totoras?	Concentración	Técnica: Cuantitativa Revisión Documental Instrumentos: Espectrofotómetro, pHmetro, Reactivos. Normas ambientales vigentes.
			Nivel de concentración en función del tiempo	Concentración vs. Tiempo	¿Cumple el agua natural con los límites permisibles de Flúor?	Concentración Tiempo	Técnica: Cuantitativa Instrumentos: Computadora y Software de análisis de datos.

3.7 Procedimientos para la recolección de información

- a. La presente investigación se referencia en trabajos similares detallados en artículos técnicos, revistas científicas de primer impacto, libros especializados en temas de tratamientos de aguas y la experiencia del experimentador y colegas a fines a las ciencias relacionadas al presente tema de estudio, apoyándose con herramientas bibliográficas como Mendeley para poder realizar una base de datos confiable.
- b. La caracterización del agua natural es esencial dentro de la investigación y dimensionamiento de un sistema, ya que se fundamenta en el diagnóstico del tipo de agua a tratarse. Por tal motivo dicha caracterización se realizó con el laboratorio acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriana (SAE) de la EP-EMAPA-A, basados en ciertos parámetros de estudio de la Tabla 1 del TULSMA de la revisión del 2015. A partir de este diagnóstico se pudo identificar el cumplimiento e incumplimiento frente a los límites máximos permitidos en cada parámetro de estudio y así ubicar el escenario idóneo para el tratamiento del problema.
- c. El diseño del lecho filtrante se basó en el uso de materiales estandarizados que pueden ser escalables a sistemas reales, por medio de datos técnicos como el caudal y tipo de material filtrante se pudo diseñar un sistema de lecho fluidizado con regulación de caudal para realizar las pruebas correspondientes según el diseño experimental planteado, para posteriormente realizar el respectivo análisis estadístico con la ayuda del software Statgraphics Centurion 2014.
- d. Para cuantificar la concentración de fluoruros en el agua después del tratamiento en función del tiempo se empleó la espectrofotometría UV-VIS y el ajuste de cinética de adsorción al modelo de Langmuir.

3.8 Procedimientos para el análisis e interpretación de resultados

3.8.1 Determinación de las concentraciones de fluoruro del adsorbato y adsorbente.

Para determinar la cinética de adsorción de los cuatro primeros ensayos experimentales realizados se procedió a realizar las mediciones de Fluoruro en agua cruda y agua tratada aplicando el método HACH 8029 el mismo que consistió en: Utilizar dos celdas de vidrio cuadradas de 1", en la primera celda se ubicó 10 mL de agua desionizada con conductividad menor a 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la medición del blanco y en la otra celda se colocó 10 mL de muestra diluida a la mitad (1/2), a cada una se le añadió 2 mL de reactivo SPANDS y se realizó un movimiento circular durante 5 segundos para homogenizar las mezclas, al cabo de 1 minuto de reacción se colocó la celda limpia del blanco en el compartimiento del espectrofotómetro para su medición en el programa 190 a 580 nm y posteriormente se realizó la medición por triplicado de cada muestra con reactivo, en el equipo se ubicó el factor de dilución para obtener la medida directa de la concentración en $\text{mg}/\text{L F}^-$. Antes de realizar las mediciones para verificar el uso del equipo se realizó la medición por triplicado del estándar a 0,20 mg/L para poder así calcular el error relativo con la ecuación 1 (**Ec. 1**) y cumplir con el criterio de aceptación del método establecido en APHA 4500 F^- que es de 4,9 %.

$$\text{Error Relativo (\%)} = \frac{|A-B|}{A} * 100\% \quad \text{Ec.1}$$

Donde A es el valor teórico del estándar usado en la medición y B es el valor medido en $\text{mg}/\text{L F}^-$.

3.8.2 Determinación del pH (Potencial Hidrógeno) en muestras.

Para la determinación del pH se utilizó el método APHA 4500-H+B, el mismo que indica el uso del electrodo previamente verificado en solución buffer pH 7, y la medición con agitación constante de las muestras a temperatura ambiente hasta la obtención de la medida del

resultado en Unidades de pH (UpH), las mediciones se realizaron por triplicado y se registró el valor promedio junto con sus respectivas desviaciones estándar, para el caso del agua cruda las mediciones se realizaron durante los días de experimentación y se trabajó con el valor promedio al tiempo inicial.

3.8.3 Análisis del Diseño experimental 2^K

Para efectuar el análisis estadístico se utilizó el software Statgraphics Centurion 2014 y se evaluó el diseño factorial de tres variables a dos niveles cada uno, la respuesta experimental se fundamentó en el valor máximo permitido de fluoruro en agua de 1,5 mg/L para identificar los mejores tratamientos con los cuales se realizó las corridas experimentales posteriores, además en análisis de varianza ANOVA permitió la verificación de la veracidad de las mediciones para cada tratamiento experimental ejecutado.

3.8.4 Ajuste de la cinética de adsorción al modelo de Langmuir.

Para poder realizar la isoterma de Langmuir la cual ajusta los datos experimentales a un modelo matemático lineal que relaciona la adsorción sólido-líquido como se evidencia en [33], se requirió utilizar las condiciones experimentales del mejor tratamiento obtenido del análisis estadístico del diseño experimental 2³, los mismos que consistieron en aplicar cinco diferentes niveles de carga (kg) para el 30% de HAP y 70% de HAP, este experimento se ejecutará luego de definir el sistema donde se obtenga la menor concentración de fluoruro, siendo estos los siguientes: Para 30% = 5,4 kg, 10,8 kg, 16,2 kg, 21,6 kg y 27 kg. Para 70% = 12,6 kg, 25,2 kg, 37,8 kg, 50,4 kg y 63 kg. Las cargas se definieron a partir de los datos técnicos del diseño del lecho fluidizado. Para la obtención de los parámetros de ajuste al modelo de Langmuir se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$q = \frac{(C_0 - C_e)}{m} * V \quad \text{Ec. 2}$$

Donde q es la carga en mg de adsorbato por Kg de adsorbente, C_0 es la concentración inicial de fluoruro en agua cruda en mg/L F^- y C_e es la concentración en el equilibrio de fluoruro en agua tratada en mg/L F^- , m es la masa de adsorbente suministrada al sistema en kg y V es el volumen de muestra en L que recorre el lecho fluidizado en sistema constante a razón de un caudal Q en L/min en un tiempo T en días.

La ecuación de Langmuir permite determinar la capacidad de adsorción máxima en un sistema a partir de datos que se obtiene experimentalmente ajustados a la siguiente ecuación:

$$q_t = \frac{q_{m\acute{a}x} * K * C_e}{1 + K * C_e} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde q_t (q) es la carga de adsorbato por carga de adsorbente mg/kg, $q_{m\acute{a}x}$ es la carga máxima en mg/Kg de adsorbato en el adsorbente, K es una constante que indica la fuerza de unión y C_e es la concentración en mg/L de F^- del adsorbato en la solución. Para poder obtener los datos de cantidad máxima adsorbida y la fuerza de unión es necesario utilizar la ecuación 3 (Ec.3) que es la forma lineal de la ecuación de Langmuir Ec.4, así:

$$\frac{C_e}{q_t} = \frac{1}{q_{m\acute{a}x}} C_e + \frac{1}{q_{m\acute{a}x} * K} \quad \text{Ec. 4}$$

$$y = mx + b$$

Donde:

C_e/q_t	y: ordenada
$1/q_{m\acute{a}x}$	m: pendiente
C_e	x: abscisa
$1/(q_{m\acute{a}x} * K)$	b: Intercepto

3.9 Aspectos éticos

El objetivo de evaluar la cinética de adsorción de fluoruro de agua natural mediante el uso de la Hidroxiapatita de Calcio, se fundamenta en ofrecer

una alternativa viable a un problema de naturaleza endémica con antecedentes de más de 20 años en la zona Sur de la Provincia de Tungurahua, por tal motivo, encontrar una solución factible, sostenible y sustentable como el uso de un material de menor costo y fácil aplicación y manejo representa una oportunidad frente al uso de tratamientos químicos o físicos de alto valor de consumo energético, logístico y que demanda de personal altamente capacitado, si bien, el uso del intercambio iónico, la ósmosis inversa o la precipitación química son los métodos más utilizados cada uno de estos incluye un pretratamiento primario y adicionalmente gastos de funcionamiento que triplican la tasa básica de consumo de agua por habitante, además de mantenimientos y operación, el presente estudio busca ser referente en brindar información y viabilidad ante dicha realidad basados en estudios confiables y veraces que pueden ser utilizados por la colectividad para los fines pertinentes.

4. CAPITULO IV

4.1 Resultados

4.1.2. Caracterización del agua natural en función de la normativa ambiental vigente.

Como se indica en el Anexo 2 se ha identificado la caracterización del agua a partir de análisis llevados a cabo en laboratorio acreditado por el SAE y se han obtenido los siguientes resultados que han sido comparados con la Tabla 1 del TULSMA:2015 como se muestra en el Anexo 1.

Tabla 4 Caracterización de Agua Natural JAPS Totoras

Parámetro	Límite máximo Permisible	Resultado
Arsénico (µg/L)	100	2,5
Cianuros (mg/L)	0,1	0,001
Coliformes Fecales (NMP/100mL)	1 000	2
Color Real (U Pt-Co)	75	4
Cromo Hexavalente (mg/L)	0,05	0,007
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	< 4	0
Fluoruros (mg/L)	1,5	3,65
Hierro (mg/L)	1,0	0,02
Nitratos (mg/L)	50,0	15,2
Nitritos (mg/L)	0,2	0,025
pH (UpH)	6 - 9	7,72
Sulfatos (mg/L)	500	163
Turbidez (NTU)	100,0	0,20

Nota: Los análisis fueron realizados en el laboratorio de Control de Calidad de la EP-EMAPAA el cual está acreditado por el SAE bajo norma 17025:2018. La muestra se analizó en Julio de 2020, en los parámetros más importantes de la Tabla 1. Criterios de Calidad de Fuentes de Agua para Consumo Humano y Doméstico. TULSMA. Libro VI. Anexo 1.

Fuente: CC-EP-EMAPAA, 2020.

Como se puede evidenciar el parámetro Fluoruros es el único parámetro que se encuentra fuera de control e incumple actualmente con lo estipulado en la legislación vigente.

4.1.3 Determinación de la cinética de Adsorción de Fluoruro sobre Lecho con Hidroxiapatita de calcio.

Para definir la cinética se empleó los valores de la concentración del adsorbato en el adsorbente y el adsorbato en la solución, para lo cual se obtuvo el promedio de las mediciones por triplicado de la concentración de fluoruro en mg/L F⁻ durante 10 días, además se realizó el análisis del agua cruda sin tratamiento desde el día 0 hasta el día 10 para obtener el promedio global de la concentración inicial de Fluoruro en agua natural, los datos obtenidos se detallan a continuación:

Tabla 5 Promedio de las Mediciones de Fluoruro en cada Experimento

Tiempo	Concentración 30_2_10	Concentración 30_5_10	Concentración 70_2_10	Concentración 70_5_10
0	3,60±0,03	3,57±0,02	3,55±0,03	3,53±0,03
1	1,19±0,04	1,36±0,01	0,52±0,02	0,65±0,01
2	1,27±0,05	1,42±0,02	0,78±0,04	0,86±0,02
3	1,44±0,03	1,54±0,01	0,83±0,02	1,11±0,03
4	1,67±0,05	1,79±0,02	0,91±0,01	1,24±0,01
5	1,85±0,09	2,83±0,01	1,26±0,03	1,58±0,01
6	2,16±0,01	2,98±0,01	1,52±0,03	1,79±0,03
7	2,53±0,03	3,12±0,02	1,96±0,02	2,32±0,02
8	3,06±0,02	3,25±0,04	2,14±0,01	2,57±0,03
9	3,21±0,07	3,36±0,01	2,37±0,03	2,63±0,03
10	3,33±0,03	3,49±0,05	2,46±0,03	2,68±0,01
Error Relativo	1,67	3,33	3,33	1,67

Nota: En la presente tabla se detallan los valores de concentración promedios de 3 mediciones en mg/L F⁻, con su respectiva desviación estándar en función del tiempo expresado en días, además se incluye el valor del error relativo en (%) antes de la realización de las mediciones en cada ensayo para cumplir con el criterio del método estandarizado siendo los valores medidos promedios en mg/L F⁻ de 0,20±0,04; 0,19±0,01; 0,21±0,02 y 0,20±0,01, para los valores de 30_2_10 (30% de HAP, 2 L/min, 10 días), 70_2_10 (70% de HAP, 2 L/min, 10 días) y 70_5_10 (70% de HAP, 5 L/min, 10 días).

Elaborado por: Tirado M. 2020.

Una vez obtenidas las concentraciones al cabo de 10 días, estas corresponden a las concentraciones del adsorbato en la solución, y mediante la aplicación de la ecuación 5 (Ec.5), se pudo obtener la concentración del adsorbato en el adsorbente, teniendo en cuenta que el valor al tiempo de 0 días es un promedio global del agua cruda en cada día de prueba, por lo tanto, dicho valor es constante.

$$C_a = C_0 - C_e \text{ Ec.5}$$

Donde C_a es la concentración de adsorbato en el adsorbente, C_0 es la concentración inicial en el agua cruda y C_e es la concentración en el equilibrio luego del tratamiento a cada período de tiempo.

Tabla 6 Concentraciones de Adsorbato en el Adsorbente

Tiempo	Concentración 30_2_10	Concentración 30_5_10	Concentración 70_2_10	Concentración 70_5_10
1	2,40	2,20	3,03	2,88
2	2,32	2,15	2,77	2,67
3	2,16	2,03	2,72	2,42
4	1,93	1,78	2,64	2,30
5	1,75	0,74	2,29	1,95
6	1,44	0,58	2,03	1,75
7	1,07	0,45	1,59	1,21
8	0,54	0,32	1,41	0,96
9	0,39	0,21	1,18	0,91
10	0,27	0,08	1,09	0,86

Nota: En la presente tabla se detallan los valores de concentración en mg/L F⁻ de adsorbato en el adsorbente luego de aplicar la Ec. 5.

Elaborado por: Tirado M. 2020.

Los valores de Concentración en el equilibrio C_e y concentración en el adsorbente C_a en función del tiempo indican la tendencia del comportamiento del material adsorbente en el tiempo.

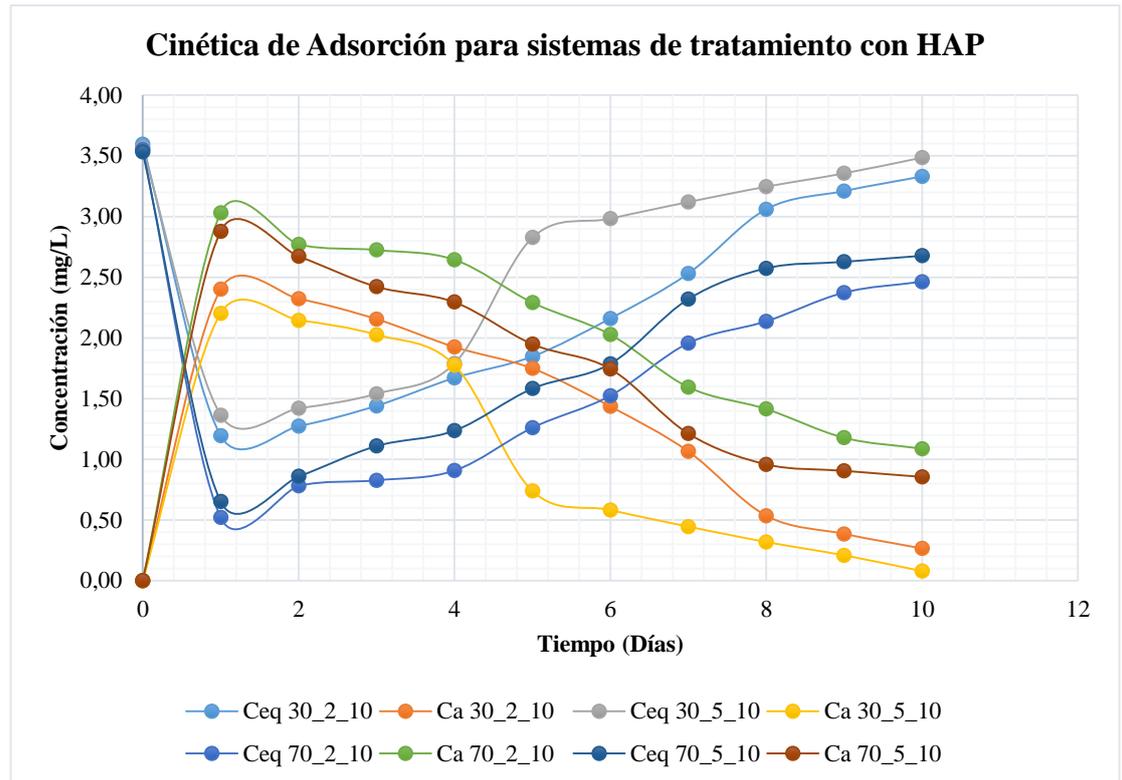


Figura 2. Cinéticas de Adsorción

Nota: En la presente figura se representa la variación de la concentración del adsorbato en la solución (C_{eq}) en función del tiempo, así como la concentración del adsorbato en el adsorbente (C_a) en función del tiempo para sistema a 30% y 70 % de HAP, 2 L/min y 5 L/min y 10 días de tratamiento.

Para determinar la eficiencia del sistema se requiere utilizar la ecuación 6 (Ec.6), que relaciona la diferencia entre el valor inicial con el valor medido para el valor inicial multiplicado por 100, este resultado permitió identificar los puntos de máxima remoción para el sistema en estado continuo y la viabilidad de su aplicación con respecto a su análisis de factibilidad.

$$Eficiencia (\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} * 100\% \quad \text{Ec.6}$$

Donde C_0 es la concentración inicial en el agua cruda y C_e es la concentración en el equilibrio luego del tratamiento a cada período de tiempo.

Tabla 7 Eficiencia de Remoción de Fluoruro aplicando HAP

Tiempo	Eficiencia 30_2_10	Eficiencia 30_5_10	Eficiencia 70_2_10	Eficiencia 70_5_10
1	66,81	61,24	84,30	80,07
2	64,58	59,67	77,07	74,32
3	59,95	56,33	75,77	67,36
4	53,55	49,38	73,54	63,84
5	48,63	20,54	63,71	54,20
6	39,92	16,18	56,39	48,54
7	29,63	12,38	44,34	33,71
8	14,89	8,86	39,33	26,66
9	10,71	5,80	32,75	25,18
10	7,38	2,18	30,24	23,79

Nota: En la presente tabla se detallan los valores de eficiencia en (%) luego de aplicar la Ec. 6.

Elaborado por: Tirado M. 2020.

4.1.3. Detalle de los valores de pH en función de los ensayos de cinética de adsorción.

Se registraron los valores de pH promedios para los diferentes ensayos realizados, con la finalidad de determinar la influencia del mismo antes y después de su tratamiento, los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 8. Promedio de las Mediciones de pH en cada Experimento

Tiempo	UpH 30_2_10	UpH 30_5_10	UpH 70_2_10	UpH 70_5_10
0	7,30±0,01	7,32±0,01	7,41±0,01	7,37±0,02
1	7,48±0,03	7,51±0,06	7,52±0,08	7,62±0,04
2	7,46±0,01	7,53±0,02	7,56±0,06	7,60±0,02
3	7,35±0,05	7,47±0,01	7,50±0,01	7,54±0,02
4	7,26±0,06	7,42±0,02	7,49±0,01	7,56±0,06
5	7,29±0,02	7,39±0,03	7,47±0,03	7,46±0,02
6	7,36±0,01	7,36±0,01	7,51±0,04	7,45±0,02
7	7,32±0,02	7,40±0,03	7,36±0,01	7,42±0,01
8	7,38±0,02	7,44±0,02	7,39±0,02	7,39±0,05
9	7,45±0,04	7,49±0,09	7,45±0,02	7,41±0,01
10	7,42±0,02	7,53±0,02	7,38±0,04	7,38±0,02

Nota: En la presente tabla se detallan los valores de pH promedios de 3 mediciones en UpH, con su respectiva desviación estándar en función del tiempo expresado en días, para los valores de 30_2_10 (30% de HAP, 2 L/min, 10 días), 70_2_10 (70% de HAP, 2 L/min, 10 días) y 70_5_10 (70% de HAP, 5 L/min, 10 días).

Elaborado por: Tirado M. 2020.

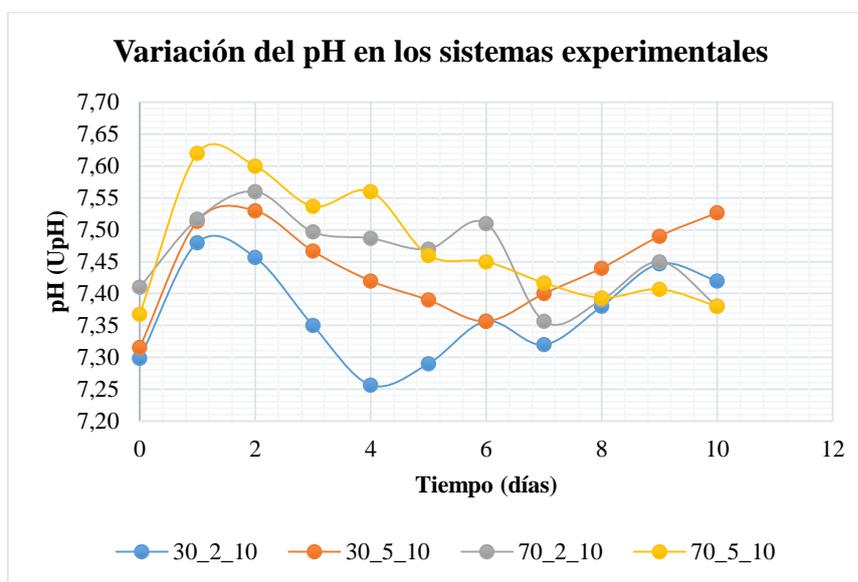


Figura 3 Variación del pH durante la experimentación

Nota: En la presente figura se representa la variación del pH medido del adsorbato en la solución (Ceq) en función del tiempo, para sistema a 30% y 70 % de HAP, 2 L/min y 5 L/min y 10 días de tratamiento.

4.1.4. Análisis de Diseño Experimental factorial 2 a la k=3.

Los resultados obtenidos de los tratamientos propuestos en la Tabla 2, se tabularon según el diseño experimental propuesto en mg/L F⁻ del adsorbato en la solución al cabo de 3 días y 10 días con los caudales de tratamiento definidos, los valores de la respuesta experimental fueron comparados con el límite máximo permisible de 1,5 mg/L F⁻ de acuerdo a la legislación ambiental vigente, para efecto de validación experimental se realizó un análisis de varianza ANOVA evaluada al 95% de confianza, adicional se obtuvieron las diferentes gráficas de interacciones que permitieron visualizar de manera práctica el efecto de las variables en las tendencias de las cinéticas de adsorción.

Tabla 9 Análisis de Varianza para diseño experimental 2 a la k=3

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
A: HAP (%)	1,8496	1	1,8496	4110,22	0,0000
B: Flujo (L/min)	0,1444	1	0,1444	320,89	0,0000
C: Tiempo (días)	12,3904	1	12,3904	27534,22	0,0000
AB	0,0144	1	0,0144	32,00	0,0005
AC	0,1024	1	0,1024	227,56	0,0000
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
Bloques	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
Error	0,0036	8	0,00045		
Total					
Total (corr.)	14,5048	15			

Nota: La tabla ANOVA indica la significancia al 95% de confianza de la interacción de las variables de estudio, las interacciones Cantidad de material adsorbente y flujo de tratamiento así como el flujo de tratamiento y el tiempo en días son representativas en los experimentos con valor de correlación del 99,95% con error absoluto promedio de 0,015.

Elaborado en: Statgraphics Centurion, 2020.

A partir de los resultados obtenidos se pudo identificar el mejor tratamiento de acuerdo al nivel máximo permisible para poder realizar el ajuste al

modelo de isoterma de Langmuir que describe la adsorción de un líquido en una superficie sólida.

La siguiente tabla indica la optimización de respuesta experimental considerando el límite máximo permisible de concentración de Fluoruro en el agua natural.

Tabla 10 Optimización de Respuesta Experimental

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
HAP (%)	30	70	70
Flujo (L/min)	2	5	2
Tiempo (días)	3	10	3

Nota: En el cuadro se detallan los niveles de los factores del diseño experimental 2 a la k=3, donde se ha definido como el nivel máximo permisible de 1,5 mg/L de F⁻ y el mejor tratamiento óptimo.

Elaborado en: Statgraphics Centurion, 2020.

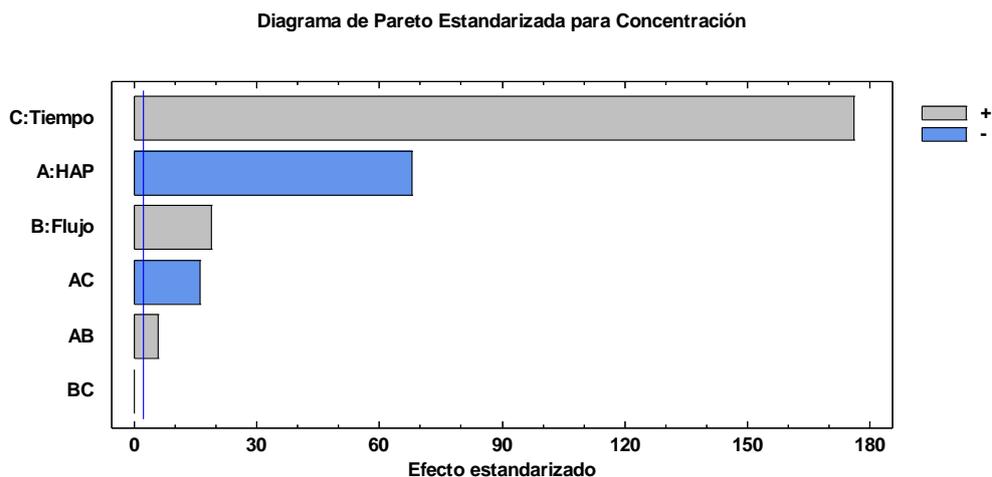


Figura 4 Diagrama de Pareto Estandarizado para el efecto de las variables sobre la concentración de fluoruro en agua natural

Nota: El gráfico de Pareto muestra cada uno de los efectos estimados en orden decreciente de importancia. La longitud de cada barra es proporcional al efecto estandarizado, el cual es el efecto estimado dividido entre su error estándar. Esto es equivalente a calcular un estadístico-t para cada efecto. La línea vertical puede utilizarse para juzgar cuáles efectos son estadísticamente significativos. Cualquier barra que se extienda más allá de la línea corresponde a efectos que son estadísticamente significativos con un 95,0% de nivel de confianza. En este caso, 5 efectos son significativos.

Elaborado en: Statgraphics Centurion, 2020.

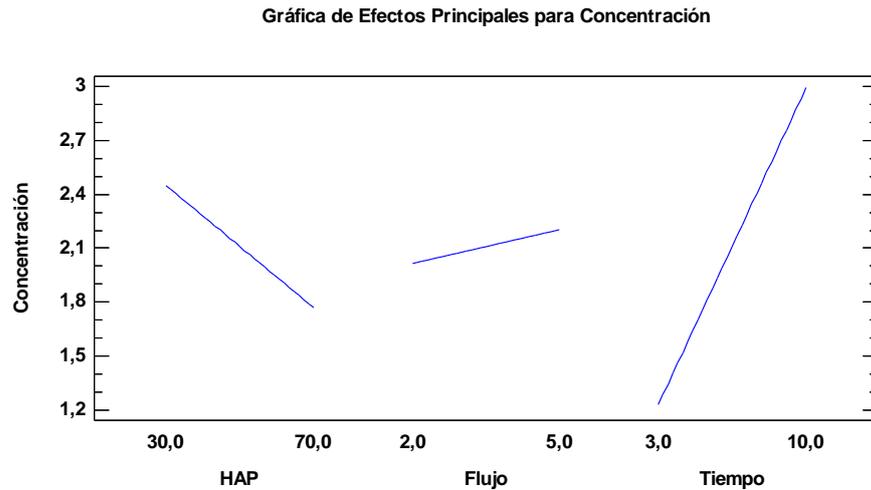


Figura 5 Efectos de las variables sobre la concentración final de fluoruro.

Nota: Esta gráfica muestra los estimados de Concentración como una función de cada factor experimental. En cada gráfica, el factor de interés se varía de su nivel bajo a su nivel alto, mientras que los demás factores se mantienen constantes en sus valores centrales.

Elaborado en: Statgraphics Centurion, 2020.

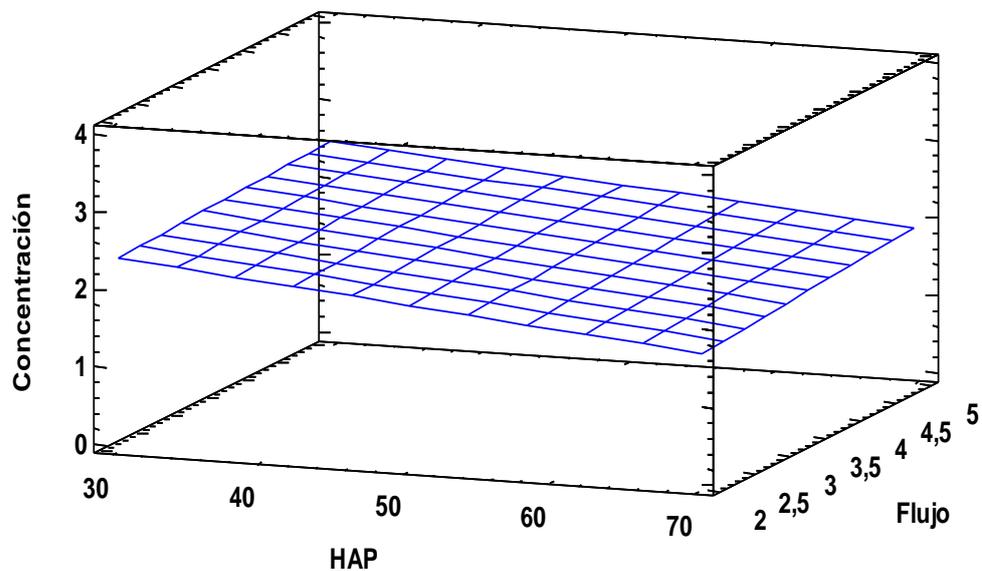


Figura 6 Gráfica de superficie de respuesta entre factores.

Nota: Esta gráfica muestra la estimación de Concentración en función de HAP y Flujo. La altura de la superficie representa los valores de Concentración. Los otros factores se mantienen constantes.

Elaborado en: Statgraphics Centurion, 2020.

4.1.5 Ajuste al modelo de Isoterma de Langmuir y determinación de parámetros de control de adsorción máxima.

El mejor tratamiento obtenido según la Tabla 10. Fue de 70% de HAP con un flujo de tratamiento de 2 L/min a 3 días de funcionamiento continuo, se obtuvo el mejor resultado en función del valor máximo permisible siendo el valor obtenido de $0,83 \pm 0,02$ mg/L F⁻, a las condiciones obtenidas según el análisis del diseño experimental ejecutado se construyó el modelo Isoterma de Langmuir de acuerdo a las cargas propuestas en el punto 3.8.4. Para el cálculo de la Isoterma de Langmuir se aplicó las ecuaciones 2, 4 y 5 respectivamente y los resultados obtenidos se indican a continuación:

Tabla 11 Parámetros de medición al Ajuste de Isoterma de Langmuir

Masa HAP (kg)	C _e (mg/L F ⁻)	pH (UpH)	C _a (mg/L F ⁻)	q ó q _t (mg/kg)	C _e /q
0,0	3,42 ± 0,03	7,11 ± 0,02	0,00	-	-
12,6	3,07 ± 0,02	7,32 ± 0,02	0,35	1,24	2,48
25,2	2,51 ± 0,01	7,43 ± 0,01	0,91	1,62	1,55
37,8	2,02 ± 0,01	7,56 ± 0,02	1,40	1,67	1,21
50,4	1,26 ± 0,03	7,61 ± 0,02	2,16	1,93	0,65
63,0	0,89 ± 0,02	7,65 ± 0,01	2,53	1,81	0,49

Nota: Se realizó la toma de muestras al cabo de 3 días de funcionamiento a un flujo de 2 L/min en cada nivel del 70% de HAP, los valores presentados son el resultado de las mediciones por triplicado, también se incluye los valores de PH de las mediciones por triplicado, además se incluyen los valores de q y C_e/q para la estimación de la isoterma de Langmuir.

Elaborado por: Tirado M. 2020.

El cambio de pH indica un aumento proporcional a la cantidad de masa de HAP incluida en el sistema a 45 L de agua con un flujo de 2 L/ min la tendencia que se muestra es creciente e inversamente proporcional a

la concentración de equilibrio C_e , como se muestra en la siguiente figura:

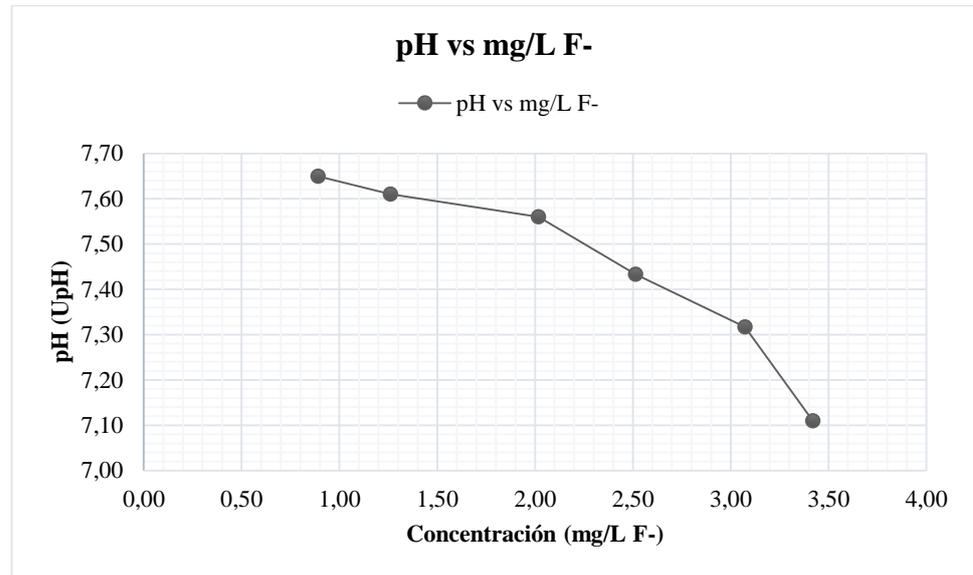


Figura 7 Variación del pH en función de la Concentración en cada carga de HAP

Nota: La figura muestra la tendencia del pH en función de la concentración de equilibrio al cabo de 3 días de tratamiento tomando como referencia el valor inicial sin carga de HAP.

Para evidenciar el comportamiento del sistema se evaluó la cinética de adsorción del Adsorbato en el adsorbente en función de la carga añadida en cada estudio el resultado se indica a continuación:

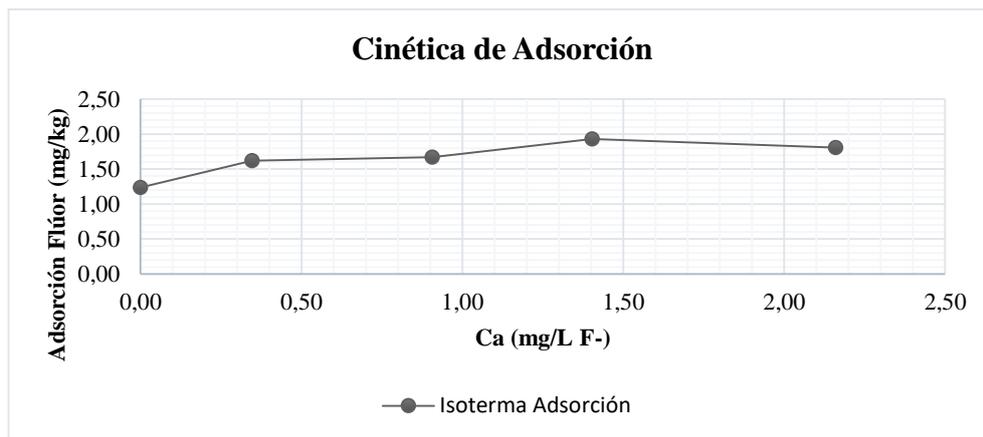


Figura 8 Cinética de Adsorción de Flúor en mg/kg

Nota: En el eje de las ordenadas se indica la carga de adsorción en mg de Adsorbato por kg de adsorbente necesarios para satisfacer las concentraciones Ca indicadas en el eje de las abscisas en mg/L F-

Con los datos experimentales evaluados en los diferentes puntos de carga se procedió a realizar los cálculos respectivos para el ajuste a la isoterma lineal del modelo de Langmuir a partir de la ecuación 4, obteniéndose la siguiente gráfica de tendencia.

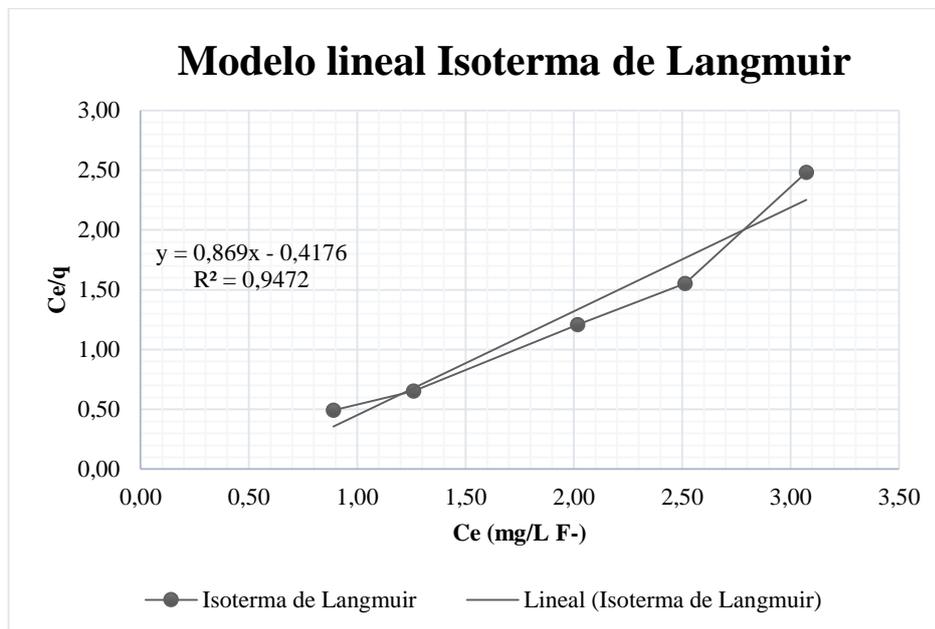


Figura 9 Isoterma de Adsorción de Langmuir

Nota: En la presente gráfica se muestra el ajuste lineal de Langmuir para la obtención de los parámetros de control en un sistema de flujo continuo a 70% de HAP, 2 L/min y 3 días de operación continua.

La ecuación lineal obtenida del modelo de $y = mx + b$ donde “y” representa la ordenada, “m” es la pendiente, “x” es la abscisa y b el intercepto de acuerdo a la ecuación 4 se define lo siguiente:

$$y = 0,869 x - 0,4176$$

$$y = mx + b$$

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{q_{m\acute{a}x}} C_e + \frac{1}{q_{m\acute{a}x} * K}$$

Dónde $q_{m\acute{a}x}$ obtiene un valor de 1,15 mg/kg y K viene dado por el valor de 2,76 L/kg con un coeficiente de correlación de 0,9472 y definen el comportamiento del sistema en la mejor condición de adsorción y puede ser escalable a sistemas de mayor flujo con una mayor cantidad de Hidroxiapatita de Calcio.

4.2. Análisis de Resultados

4.2.1. Caracterización Agua Cruda proveniente de la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento de Totoras.

Como se detalla en la tabla 4, el agua natural del sector de Totoras, aparentemente presenta condiciones óptimas para ser usada en el abastecimiento para el consumo humano, sin embargo, el único parámetro de incumplimiento se evidencia en la concentración de Fluoruro en más del 50% de la concentración máxima permitida de 1,5 mg/L F⁻, siendo esta de 3,65 mg/L F⁻, como detalla en [9], el antecedente de la zona Sur de Ambato indica un historial de más de 20 años que ha mantenido estas condiciones en ciertos sectores siendo la consecuencia visible la fluorosis dental en los habitantes. Fuera del parámetro Flúor se ha definido que el agua cruda natural tiene una característica de acidez neutra tendiendo a la alcalinidad por su pH de 7,72 UpH, dentro de esta caracterización se pudo identificar de igual manera un valor de 163 mg/L de Sulfatos (SO₄²⁻) que se puede considerar alto a pesar de encontrarse dentro de los límites máximos permisibles, adicional los

valores de DQO, nitratos, color y turbidez muestran valores bajos por lo cual el tratamiento de esta matriz se reduciría a una filtración y desinfección común, quedando solamente como problema a central la reducción de la concentración de fluoruro.

4.2.2. Cinética de Adsorción de Fluoruro según el diseño experimental 2 a la $k=3$.

La cinética de adsorción de fluoruro se llevó a cabo aplicando la metodología modificada propuesta en [34], donde se evalúa el efecto de la alúmina activada en la adsorción de flúor del agua, en los resultados obtenidos en las tablas 5 y 6 respectivamente se puede evidenciar claramente que en las condiciones de temperatura promedio de entre 11°C a 20°C los experimentos al 30% (27 kg HAP), 70% (63 kg HAP), 2 L/min, 5 L/min, 3 días y 10 días de trabajo continuo, experimentaron un máximo de adsorción de fluoruro en el adsorbente siendo los valores de equilibrio: $(1,19 \pm 0,04; 1,36 \pm 0,01; 0,52 \pm 0,02 \text{ y } 0,65 \pm 0,01)$ mg/L F^- de adsorbato en la solución, dichos resultados cumplen con el requerimientos de ser menores a 1,5 mg/L F^- , sin embargo, al cabo de las 72 horas la tendencia de las concentraciones en el equilibrio comienzan a elevarse al punto de indicar una tendencia estacionaria al cabo de 10 días casi igualando la concentración inicial de partida en cada caso. En [35], los resultados que obtuvieron al usar hueso calcinado indican eficiencias en sus estudios a escala de laboratorio del 97 %, con una saturación inmediata del medio adsorbente lo cual comprueba la tendencia del sistema a escala de banco *in situ*, en el presente caso las mejores eficiencias obtenidas fueron las de los tratamientos al 70% de HAP con el 84,30% y 80,07 % para los flujos de 2 L/min y 5 L/min respectivamente lo cual permite inferir que los tratamientos al 30% de HAP no fueron efectivos por su rápida saturación del medio y su baja capacidad adsorbente. Como se indica en la Figura 2, los comportamientos de las cinéticas de adsorción en función del tiempo

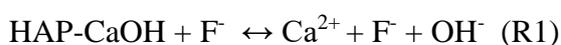
describen 4 curvas que describen sus concentraciones de equilibrio a tiempos que oscilan entre los 3 días a 5 días en flujo constante. En [36] se detalla que la eficiencia de adsorción en su mayoría depende del área superficial del material, en dicho estudio define la eficiencia del carbón activado con un área superficial de $1208 \text{ m}^2/\text{g}$, en el caso de estudio actual según el detalle técnico del Anexo 3. El diámetro de poro de la HAP va de (0 a 50) μm , lo cual indica un área superficial aceptable pero no excelente, por otra parte, la pureza de la sustancia es del 99% por lo cual, los componentes de su estructura $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, permitieron una mayor interacción de intercambio iónico entre el adsorbato y el adsorbente no siendo mayor el período de eficiencia a 72 horas de trabajo continuo en un flujo de 2 L/min a 5 L/min.

Se evaluó la influencia del pH en cada sistema de prueba y se determinó que no afecta significativamente las condiciones de trabajo, según la figura 3 el pH en cada tratamiento antes de añadir el HAP, el sistema mantiene el pH no inferior a 7 UpH ni superior a 8 UpH, sin embargo, las tendencias indican que al momento de la interacción del adsorbato con el adsorbente la solución resultante incrementa su pH de manera no significativa ya que no sobrepasa las 8 UpH y eventualmente regresa a un valor cercano al nominal al cabo de 10 días de tratamiento continuo, según la ENOHSA, el tratamiento de las agua ricas en flúor a partir de alúmina activada indican un comportamiento similar con la alúmina activada [37], con la diferencia que este producto si eleva el pH del medio y eventualmente regresa al valor de pH inicial, este fenómeno si bien no afecta directamente al tratamiento puede considerarse un indicador de saturación del medio de tratamiento.

Después de realizar el análisis del diseño experimental ejecutado se identificó que a partir de los datos experimentales evaluados a un nivel de confianza del 95%, las variables que interaccionan directamente y presentan una influencia significativa fueron la cantidad de HAP en el medio y el flujo de tratamiento. En la Figura 4 se muestra como la cantidad de material influye directamente sobre el tiempo de adsorción

de fluoruro ya sea a 2 L/min o 5 L /min, en todo caso, la interacción del flujo y el tiempo no son significativas ya que la cantidad de material que se ubique en el sistema va a definir su eficiencia en el tiempo. Según la tabla 10 la optimización de repuesta experimental indicó que el mejor tratamiento experimental que cumple con el criterio de aceptación de obtener concentraciones menores a 1,5 mg/L F⁻ se ajustan al tratamiento de 70% de HAP con un flujo de 2 L/min en 3 días de tratamiento, la figura 5 sustenta objetivamente la influencia de los niveles de cada variable de estudio, por lo tanto resulta coherente indicar que a mayor carga de HAP se retiene más adsorbato en condiciones de flujo bajo, por otra parte a condiciones de carga menor la adsorción se ve reducida con flujos mayores, por lo tanto a mayor carga con bajo flujo de tratamiento mayor adsorción y a menor carga con mayor flujo de tratamiento menor adsorción, el tiempo de saturación viene dado por la relación directa con la carga de material e inversa con el flujo de tratamiento. La gráfica 6 detalla la conexión entre variables y ratifica el resultado obtenido en la optimización de respuesta experimental a 0,83 mg/L F⁻. En [38], el uso del carbón activado indica tendencias similares en concentraciones mayores de fluoruro en agua, pero con períodos de tiempo cortos, con una congruencia con el estudio actual entre la interacción de las variables de tratamiento y su relación en la eficiencia del sistema.

El estudio llevado a cabo a un nivel de confianza del 95% indicó que el mejor tratamiento para el estudio de ajuste a la Isoterma de Langmuir fue el de 70% (63 kg) de HAP, para un flujo de 2 L/min y 3 días de tratamiento. El resultado de evaluar las cargas proporcionales en 5 niveles del 70% indicaron una reducción de la concentración máxima a 0,89 mg/L F⁻ en el nivel máximo de 63 kg la tendencia del tratamiento se fundamenta en las reacciones de intercambio iónico que se genera entre el adsorbato y el adsorbente como se indica a continuación:



Según lo expuesto en [7] las reacciones que se producen son de desplazamiento inicialmente, dado que el OH de la apatita es desplazado por la afinidad del ión fluoruro por el calcio, sin embargo, también es característica de intercambio iónico puesto que el sistema deberá ser regenerado a los 3 días de trabajo en las condiciones de 2 L/min con NaOH en concentración del 5% [39]. Las reacciones 3 y 4 indican el intercambio iónico cuando se realiza una regeneración del medio en el lecho fluidizado.



Una vez alcanzado el equilibrio como se indica en la reacción 2, a temperatura ambiente, el sistema se ajustó a una cinética de adsorción donde se identifica la carga de adsorbato por cantidad de adsorbente frente a la concentración del adsorbato contenido en el adsorbente como se muestra en la figura 8. En este punto de igual manera la tendencia del cambio en el pH se explica por la reacción 3 la cual indica que el aumento del mismo se debe a la liberación de OH⁻ en la solución de salida del medio y mantiene una tendencia inversamente proporcional a la concentración de adsorbato en la solución como se muestra en la figura 7.

La isoterma de Langmuir se construyó de acuerdo al modelo lineal definido por la relación entre la concentración en el equilibrio y la carga de adsorbato en el adsorbente en función de la concentración en el equilibrio, una vez obtenida la tendencia lineal con un coeficiente de relación de 0,9472 se pudo determinar que la carga máxima para el sistema del 70% de HAP a 2 L/min en 3 días de tratamiento es de $q_{\text{máx}}$ de 1,15 mg de adsorbato (F⁻) por kg de masa de adsorbente (HAP) con un factor de $K = 2,76$ Litros de sustancia por kg de Adsorbente para generar una fuerza de unión eficiente. Los valores obtenidos permiten realizar un dimensionamiento a niveles de tratamiento superiores

manteniendo la eficiencia del sistema máxima basado en la normativa ambiental vigente.

Actualmente en el mercado el uso de tecnologías como la ósmosis inversa, el intercambio iónico o el tratamiento químico representan rubros de operación y mantenimiento que sobrepasan el presupuesto de las Juntas de Agua que en el caso de estudio es de \$ 68 000, a continuación, se detalla un análisis de costos referente a los sistemas más comúnmente usado para eliminar aniones como el flúor o el arsénico para un caudal de 5 L/s en sistema estacionario industrial según [40].

Tabla 12 Análisis de costos actuales del mercado para tratamiento de aguas

Tratamiento	Eficiencia de remoción aniones (%)	de Costo Inicial (\$)	Costo Anual (\$)
Ósmosis Inversa	95 a 99	250 000,00	125 000,00
Resinas de Intercambio Iónico	80 a 90	133 400,00	66 700,00
Tratamiento Químico	50 a 77	121 250,00	60 625,00
Tratamiento de Intercambio Iónico con HAP	30 a 85	50 000,00	12 500,00

Nota: En la presente tabla se detalla el costo aproximado de los sistemas comúnmente utilizados para la eliminación de aniones en agua de consumo humano, así como las eficiencias esperadas para un flujo de 5 L/s para sistemas industriales.

Fuente: Osmopurif Water, 2021.

La tabla 12 indica los valores aproximados del mercado actual, generalmente estos sistemas vienen acompañados de un pretratamiento primario y secundario y son considerados en sí como tratamientos terciario o de refinamiento, su duración va desde los 2 a 3 años dependiendo el uso y mantenimiento que se aplique a cada uno, sin

embargo, se puede identificar que sistemas como la ósmosis inversa o el intercambio iónico en tratamientos continuos representan un gasto anual de cerca del 50% de la implementación inicial lo cual convierte en estas alternativas en opciones donde el flujo de tratamiento sea estacionario o de muy bajo flujo de tratamiento, mientras que la tendencia por el uso de nuevos materiales como la Hidroxiapatita de Calcio supone una reducción en costos estos se pueden ver opacados por el hecho de que su eficiencia es reducida y requiere de mantenimiento a corto plazo lo cual lo convierte en una tecnología viable para sistemas industriales más no para sistemas continuos.

5. CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

- ❖ La caracterización del agua natural de la Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento de Totoras, indicó ser apta para el uso de consumo humano según la Tabla 1 del TULSMA, siendo el único parámetro fuera de control el fluoruro, cuya concentración de 3,65 mg/L F⁻, sobrepasó el límite máximo permisible de 1,5 mg/L F⁻, a partir de este diagnóstico se pudo realizar el planteamiento de la sistemática para evaluar un sistema sostenible y sustentable para la reducción del analito de interés.
- ❖ Se determinó la tendencia de la cinética de adsorción de Fluoruro del agua natural sobre el lecho fluidizado con hidroxiapatita de calcio comercial y se definió su comportamiento al cabo de 10 días donde los tratamientos con HAP al (30% y 70%), flujo de tratamiento (2 L/min y 5 L/min) y Tiempo de tratamiento continuo (3 días y 10 días), permitieron obtener los datos experimentales por medio de la medición espectrofotométrica con el método SPANDS a 580 nm, las curvas obtenidas demuestran saturación del sistema al cabo del cuarto y quinto día siendo el máximo nivel de adsorción a las 24 horas de tratamiento.
- ❖ La eficiencia del sistema se determinó al cabo de tres días en el tratamiento de 70% de HAP a 2 L/min de flujo en sistema continuo siendo este un valor máximo de 75,77% de remoción con una concentración de $0,83 \pm 0,02$ mg/L F⁻, además se evaluó la influencia del pH la misma que tiende a incrementar a razón máxima de 0,09 unidades de pH lo cual se debe al desplazamiento del OH⁻ en la solución luego de que los iones F⁻ se adhieren a los cationes de Ca²⁺ de la apatita, sin embargo, por lo cual el pH se puede considerar como un indicador de saturación del sistema.
- ❖ En el diseño experimental 2 a la k=3 se verificó la veracidad de los datos mediante el análisis ANOVA realizado al 95% de nivel de confianza, los datos experimentales de concentración se evaluaron con la

herramienta de optimización de respuesta sienta el mejor tratamiento al nivel alto de carga de HAP con el nivel bajo de flujo a tres días de tratamiento, el diagrama de Pareto indicó interacciones directas entre el nivel de carga y flujo de tratamiento así como el nivel de carga y el tiempo de tratamiento siendo la interacción de flujo y tiempo de tratamiento no significativa frente a las mencionadas anteriormente.

- ❖ El mejor tratamiento obtenido del 70% de HAP a un flujo de 2 L/min durante 3 días de tratamiento, se ajustó al modelo lineal de Langmuir donde se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,9472, el mismo que si bien indica un correcto ajuste al modelo no representa una exactitud del mismo, sin embargo, es aceptable. El valor de $q_{\text{máx}}$ obtenido representado por un valor de 1,15 mg de adsorbato que puede ser captado por cada kg de adsorbente y con un factor de unión de K de 2,76 Litros de sustancia por cada kg de adsorbente suministrado al sistema, permiten extrapolar las mejores condiciones del tratamiento a sistemas de mayor flujo de tratamiento, sin embargo, el tiempo de tratamiento resulta muy corto para un flujo de tratamiento en sistema continuo lo que resulta en el aumento de costos de mantenimiento y operación.

5.2 Recomendaciones

- ❖ Si bien los resultados obtenidos con el intercambio iónico con HAP en un sistema de lecho fluidizado disminuye la concentración de fluoruros en agua natural, este resulta ser de baja duración en función del tiempo, por lo que se recomienda la alternativa de buscar otros materiales adsorbentes que permitan obtener eficiencias mayores al 70% de

remoción del adsorbato y períodos de tiempo de saturación no menores a 10 días.

- ❖ Se recomienda la implementación del uso de la Hidroxiapatita de calcio para sistemas de flujo estacionario o por lotes como los que se aplican en industrias, dado que los resultados en sistemas continuos en flujos mayores representan bajos rendimientos en el tratamiento.
- ❖ Frente al uso de las alternativas de sistemas terciarios de tratamiento para la eliminación de flúor se recomienda que se realice la captación o mezcla del agua problema con otra fuente de agua que carezca de flúor para su respectiva dilución siendo esta la alternativa más viable en términos de económica y logística, sin embargo, estas técnicas resultan favorables para sistemas a menor escala.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Nieto, “La gestión del Agua: Tensiones Globales y Latinoamericanas”. *Política y Cultura*, no. 36, pp. 157-176. Junio, 2011.

- [2] A. Montiel, M. Balcázar, M. Fernández, J. Morales y J. Varela, “Eliminación de Flúor en Agua Potable Utilizando Zeolita Natural (*Clinoptilolita*)”. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud Biotecnia*, vol. XV, no. 2, pp. 10-14. Noviembre, 2012.
- [3] Tagua, “HINDROP”, Islas Canarias –España, 2016.
- [4] J. Ruan, Z. Wang, A. Bardsen, A. Astrom y K. Bjorvatn, “Dental fluorosis in primary teeth: a study in rural schoolchildren in Shaanxi Province, China”. *IAPD*, vol. 17, no. 15, pp. 412-419. 2005.
- [5] R. Huízar, J. Carrillo y F. Juárez, “Fluoruro en el agua subterránea: niveles, origen y control natural en la región de Tenextepango, Morelos, México”. *IGB UNAM*, no. 90, pp. 40-58. Agosto, 2015.
- [6] M. Piñón, A. Pérez, R. Bautista, “Disminución de Flúor y Arsénico utilizando Sulfato de Aluminio y Polímero Aniónico en Agua Subterránea”. *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún*, 27 al 31 octubre, 2002, pp. 02-06.
- [7] J. Coreño, J. Mújica, C. Hernández, A. Herrera y J. García, “Evaluación de la hidroxiapatita nanoparticulada como material adsorbente de iones flúor, plomo y arsénico en soluciones acuosas”. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*, no. 23, pp. 161-165. Agosto, 2010.
- [8] *Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente*, Registro Oficial 097-A Ecuador, Noviembre, 2015.
- [9] A. Cáceres, E. Hernández y L. Leiva, “Elementos fisiológicos y fisiopatológicos en la Fluorosis dental”. *Mediciencias UTA*, no. 2, pp. 2-6. Febrero, 2018.
- [10] *NTE INEN 1108 Agua para Consumo Humano. Requisitos*, Servicio Ecuatoriano de Normalización, Revisión 6, Abril 2020.
- [11] J. Singh, P. Singh and A. Singh, “Fluoride ions vs removal technologies: A study”. *Arabian Journal of Chemistry*, no. 9, pp. 815-824. 2014.

- [12] L. Gómez, J. Pérez, I. Díaz, “Materiales compuestos de zeolite-hidroxiapatita para la eliminación de fluoruro del agua potable”. *An. Quím.* vol. 110, no. 4, pp. 276-283. Septiembre, 2014.
- [13] Organización Mundial de la Salud, “Guías para la calidad del agua potable”. *OMS*, vol. 1, no. 3, pp.157. 2006.
- [14] J. Arriaga, “VII Foro Mundial del Agua”. En República de Corea, 12-17 de abril 2015.
- [15] J. Roque, N. Zavala, “El flúor en los dientes ¿Perjuicio o beneficio?”. *Universidad Potosinos*, no. 212, pp. 25-29. Abril, 2017.
- [16] M. Salazar y C. Larrea, “Prevalencia de fluorosis dental y determinación del grado de severidad en niños de 6 a 15 años en la Florícola Valleflor ubicada en el Valle de Tumbaco”. *Odonto Investigación*, vol. 1 no. 1, pp. 22-27. Marzo, 2015.
- [17] D. Nordstrom and E. Jenne, “Fluorite solubility equilibria in selected geothermal waters”. *U.S Geological Survey*, vol. 41, pp. 175-188. Julio, 1976.
- [18] Subsecretaría de Minería, “Perfil de Mercado de la Fluorita”. Estados Unidos mexicanos, Diciembre, 2017.
- [19] Google Corp. “Totoras, Ambato”. Google Maps, <https://www.google.com.ec/maps/place/Parroquia+Totoras/@-1.3014598,-78.5987295,16.5z/data=!4m5!3m4!1s0x91d3831b654c024f:0x9e58af83e329e1a2!8m2!3d-1.3156615!4d-78.6058242>. Acceso 05 de enero, 2020.
- [20] R. Gómez Masaquiza, “Fluorosis dental en estudiantes de 8 a 12 años de la Escuela Fiscal Mixta Luis Vivero Espinoza de la parroquia Totoras en la ciudad de Ambato año lectivo 2010-2011”. Proyecto previo a la obtención del título de Odontólogo, Facultad de Odontología. Universidad Central del Ecuador. Quito- Ecuador, 2011.
- [21] J. A. Romero, *Calidad del Agua*. 3^{ra} edición, Colombia: Editorial Colombiana de Ingeniería, 2009, cap. 3, pp. 161-165.
- [22] *Manual de Análisis de Agua*. 3^{ra} edición, HACH Company, Loveland Colorado EEUU, 2000, pp. 128-132.

- [23] K. Acosta Herrera, “Adsorción de flúor en zeolitas modificadas con óxido de magnesio”. Proyecto previo a la obtención del título de Maestría en Ciencia y Tecnología Ambiental, Departamento de estudios de posgrado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Chihuahua- México, 2014.
- [24] A. Jácome, J. Suárez, P Ures, “Reactores de Lecho Fluidizado”. *INDITEX*, Coruña. FT- BIO -007. Septiembre, 2014.
- [25] Pentair Inc. “Structural Vasos Poly Glass”. *Pentairaqu*, Milwaukee. 0948 PG 2,5” T. 2015.
- [26] A. Pedro, “Estudio de la obtención de hidroxiapatita a partir de roca fosfórica, para la remoción de flúor en aguas de pozo”. Proyecto previo a la obtención del título de Maestría en Ciencia y Tecnología en la especialidad de Ingeniería Ambiental, Interinstitucional Posgrado, Ciencia y Tecnología. Santiago de Querétaro- México, Febrero, 2015.
- [27] J. Fernández Pradas, “Obtención de recubrimientos de hidroxiapatita por ablación con láser”. Proyecto previo a la obtención del grado de Doctor, Departamento de Física Aplicada y Óptica, Univeristat de Barcelona. España, Abril, 1999.
- [28] M. García, J. Reyes, “La Hidroxiapatita, su importancia en los tejidos mineralizados y su aplicación biomédica”. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 9, no. 2, pp. 90-95. Junio, 2006.
- [29] B. Singh, G. Singh y B. Sidhu, “Analysis of corrosion behaviour and surface properties of plasma-sprayed composite coating of hydroxyapatite–tantalum on biodegradable Mg alloy ZK60”. *Journal of Composite Materials*, no. 0, pp. 1-13. 2019.
- [30] C. López, “Adsorción de ácidos carboxílicos de cadena corta sobre carbón activado: Estudio en una reacción de Esterificación”. Proyecto previo a la obtención del grado de Químico, Universidad de los Andes, Bogotá -Colombia, Marzo, 2013.
- [31] A. Rojas, C. Santiago, G. Macedo, J. González, S. Martínez, S. Díaz y C. García, “Tratamiento por electrocoagulación para la remoción de índigo carmín presente en agua”. *Afinidad LXXVI*, no. 585, pp. 37-44. Julio, 2018.

- [32] Statpoint Technologies INC. *Statgraphics Centurion*, (2014). Disponible en: <https://statgraphics.net/>. Accedido el: 07 de enero 2021.
- [33] F. Sandoval, J. López y J. García, “Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos”. *Educación Química*, no. 26, pp. 307-313. Agosto, 2015.
- [34] C. Salazar, “Adsorción de fluoruro por Alúmina Activada”. Proyecto previo a la obtención del grado de Químico Industrial, Universidad de la Laguna, Santa Cruz de Tenerife- España, Julio, 2016.
- [35] L. Valenzuela, J. Ramírez, J. Sol y J. Reyes, “Alternativas para la eliminación doméstica de flúor en el agua de consumo humano”. *Información Tecnológica*, vol. 22, no. 2, pp. 23-32. Octubre, 2010.
- [36] M. Bastidas, L. Buelvas, M. Marquéz y K. Rodríguez, “Producción de carbón activado a partir de precursores carbonosos del departamento del César, Colombia”. *Información Tecnológica*, vol. 21, no. 3, pp. 87-96. Septiembre, 2009.
- [37] Ente Nacional de Obras Hídrica y Saneamiento, E. T. Cresto, “Remoción de Flúor”. ENOHSA, Argentina, Capítulo VIII, pp. 01-29, 2010.
- [38] R. Hernández, “Estudio del comportamiento del carbón activado en la adsorción de fluoruro procedente de aguas con concentraciones elevadas”. Proyecto previo a la obtención del grado de Químico Industrial, Universidad de la Laguna, Santa Cruz de Tenerife- España, 2016.
- [39] E. H. Ramos, “Separación del ácido anacárdico por resinas de intercambio iónico”. Proyecto previo a la obtención de Doctor en Química, Universitat Ramón Llull, Barcelona- España, 2019.
- [40] Osmopurif Water. (Comunicación Privada). Ecuador, 2021.

7. ANEXOS

Registro Oficial -- Edición Especial N° 387 - Miércoles 4 de noviembre de 2015 -- 13

TABLA 1: CRITERIOS DE CALIDAD DE FUENTES DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO

PARÁMETRO	EXPRESADO COMO	UNIDAD	CRITERIO DE CALIDAD
Aceites y Grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Arsénico	As	mg/l	0,1
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	1000
Bario	Ba	mg/l	1
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro	CN ⁻	mg/l	0,1
Cobre	Cu	mg/l	2
Color	Color real	Unidades de Platino, Cobalto	75
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,05
Fluoruro	F ⁻	mg/l	1,5
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	<4
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	<2
Hierro total	Fe	mg/l	1,0
Mercurio	Hg	mg/l	0,008
Nitratos	NO ₃	mg/l	50,0
Nitritos	NO ₂	mg/l	0,2
Potencial Hidrógeno	pH	unidades de pH	6-9
Plomo	Pb	mg/l	0,01
Selenio	Se	mg/l	0,01
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	500
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	0,2
Turbiedad	unidades nefelométricas de turbiedad	UNT	100,0

Nota: Podrán usarse aguas con turbiedades y coliformes fecales ocasionales superiores a los indicados en esta Tabla, siempre y cuando las características de las aguas tratadas sean entregadas de acuerdo con la Norma INEN correspondiente.

Anexo 1. Legislación Ambiental Vigente

Nota: Tabla 1. Criterios de Calidad de Fuentes de Agua para Consumo Humano y Domestico. TULSMA. Libro VI. Anexo 1 Registro oficial 097-A.



INFORME DE RESULTADOS ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

17025-RG-CC-71-09

Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con Acreditación N° SAE LEN 14-001



EP - EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE AMBATO

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE

CLIENTE: JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO DE TUNUNBARUA, AMBATO, NOTORAS

DIRECCIÓN: DÍON OCTAVIO SOLÍS SOLÍS

PERSONA DE CONTACTO: 032748434

TELÉFONO DE CONTACTO: PLANTA DE TRATAMIENTO

PROCEDENCIA DE LA MUESTRA: INGRESO

LUGAR DONDE SE TOMÓ LA MUESTRA: 01/07/2020 09:02

FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA: PUNTUAL

TIPO DE TOMA DE MUESTRA: (Puntual/compuesta)

TIPO DE MUESTRA (MATERIA): AGUA NATURAL

RESPONSABLE DE TOMA DE MUESTRA: VICENTE SUICO

DATOS GENERALES

Código de identificación de la muestra: 30060712

FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: 01/07/2020 09:02

FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 01/07/2020

FECHA DE FIN DE ANÁLISIS: 03/07/2020

FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME: 04/07/2020

CONDICIONES AMBIENTALES: Humedad (%): 47
Temperatura (°C): 30.0

ANÁLISIS REALIZADOS

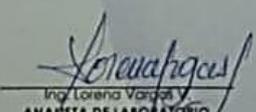
PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODO UTILIZADO	Norma de referencia: TABLA 1. CRITERIOS DE CALIDAD DE FUENTES DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO. IJLSMA. LIBRO VI. ANEXO 1 (2015)**	RESULTADOS
ASENICO *	mg/l	HACH 200000	100	2.5
CLORURO *	mg/l	HACH 8027	0.1	0.001
COLORIMET. FECALES *	mpo/100ml	APHA-9221-C	1 000	2
COLOR REAL *	U Pt-Co	HACH 8025	75	4
CROMO HEXAVALENTE *	mg/l	HACH 8023	0.05	0.007
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) *	mg/l	HACH 8000	< 4	0
FLUORURO *	mg/l	HACH 8029	1.5	3.65
HIERRO *	mg/l	HACH 8008	1.0	0.02
NITRATO *	mg/l	HACH 8029	50.0	15.2
NITRITO *	mg/l	HACH 8507	0.2	0.025
pH	U pH	APHA-4300H-B	6 - 9	7.72
SULFATO *	mg/l	HACH 8031	500	163
TURBIDEZ *	ntu	APHA-2130-B	100.0	0.20

* Ensayos fuera del alcance de acreditación del SAE.
 ** Los límites permisibles de la Norma de referencia descrita en el presente informe están fuera del alcance de acreditación del SAE.

PARÁMETRO ACREDITADO	RANGO DE ACREDITACIÓN	INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DEL MÉTODO	MÉTODO DE ENSAYO UTILIZADO
Nitrosos	0.04 - 7.20 mg/l	7%	17025-DI-CC-04-XX; Método de referencia: HACH 8029
pH	14.32 - 12.91 U pH	2%	17025-DI-CC-04-XX; Método de referencia: Standard Methods, Ed. 23, 2017, 4500 H-B
Sulfato	100 - 2800 mg/l	6%	17025-DI-CC-04-XX; Método de referencia: HACH 8031

NOTA: ESTE INFORME SOLO AFECTA A LA MUESTRA QUE SE HA SOMETIDO A ENSAYO. EL LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE LA EP-EMAPA-A NO SE RESPONSABILIZA DEL ORIGEN DE LA MUESTRA, TRANSPORTACIÓN DE LA MISMA Y VERACIDAD DE LOS DATOS DADOS POR EL CLIENTE. NO SE PERMITE A LOS USUARIOS EL USO DEL LOGOTIPO DEL SAE NI DE LA CONDICIÓN DE ACREDITADO (C/ GAR 04) O SE DEBE REPRODUCIR EL INFORME DE ENSAYO, EXCEPTO EN SU TOTALIDAD, SIN LA APROBACIÓN ESCRITA DEL LABORATORIO.

RESERVACIONES: La toma de muestra fue realizada por parte del personal del Laboratorio de Control de Calidad. Coordenadas 1° 11' 20.73" S; 78° 34' 53.07" W



Ing. Lorena Vargas
ANALISTA DE LABORATORIO





Ing. Catherine Veallegu C.
RESPONSABLE TÉCNICO

Laboratorio de Control de Calidad, EP - EMAPA - A, Vía Ecológica a Santa Rosa - Ambato
 Telef. 2585991 Ext. 101, 102, 103

EMPRESA CERTIFICADA ISO 9001 17025

www.emapa.gob.ec

Matriz: Antonio Clavijo e Isaias Sánchez
 Telef.: (03) 299-7700 / Ext: 701 - 702
 Ambato - Ecuador

Anexo 2. Análisis de Caracterización Agua Natural

Nota: Informe de resultados de Laboratorio Acreditado código SAE LEN 14-001



Typical Data Sheet

Product name: Hydroxypatite Nano

Model: Lyphar HN-20nm (99%)

Purity: 99%

Average Particle Size: 20nm

Color: White

Morphology : Needle-like

Mg \leq 0.6% Na \leq 0.15% Fe \leq 0.06 Al \leq 0.05

Sulfate: 0.048 % max Test result:0.025

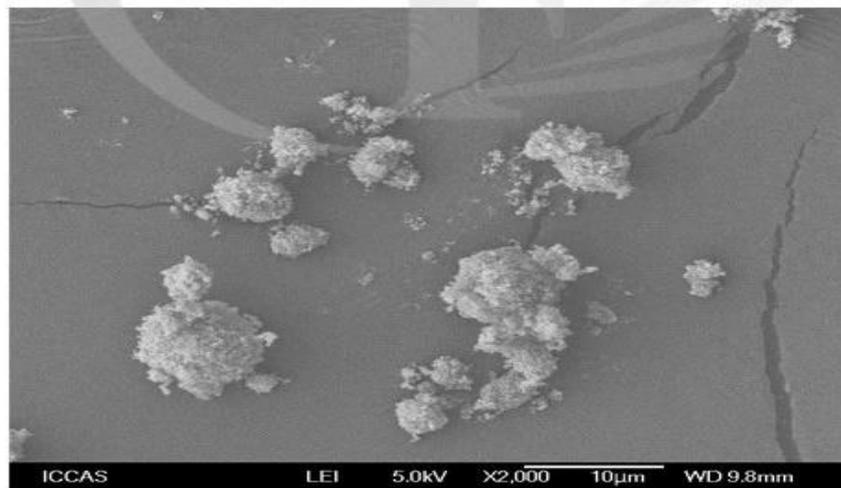
Chloride: 0.05 % max Test result:0.02

Heavy metals: 10 ppm max Test result:7

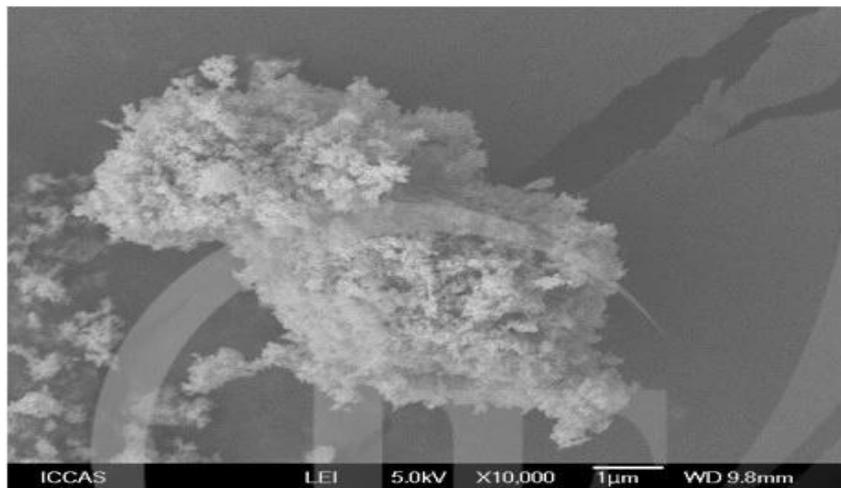
Loss on drying: 1.0 % Test result:0.75

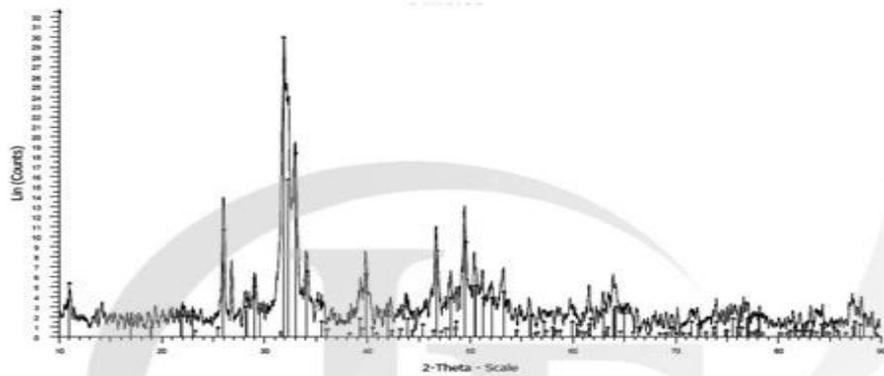
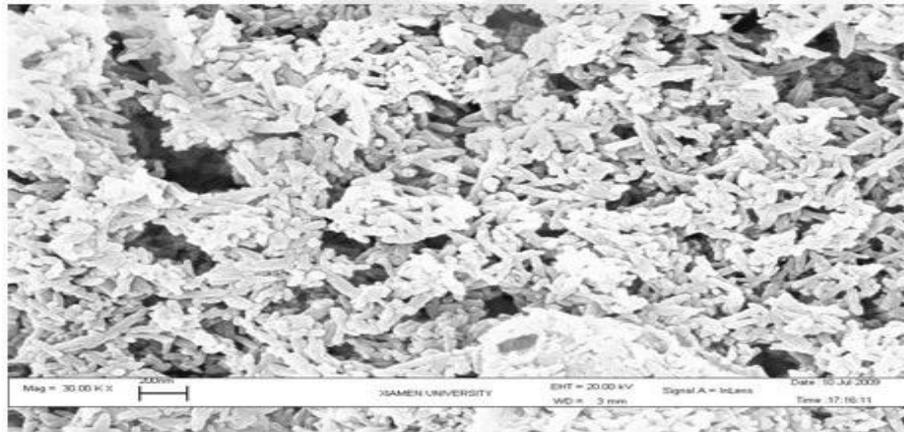


Hydroxyapatite Nano (20nm) ---99%

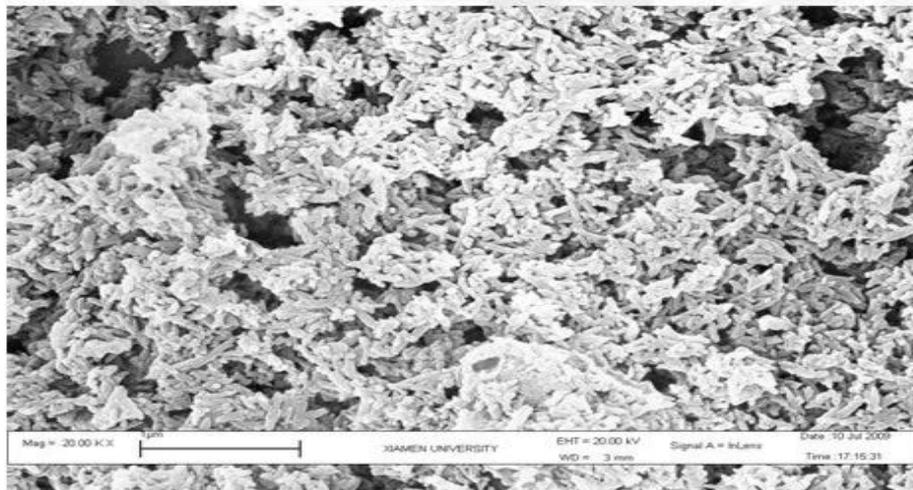


Hydroxyapatite Nano(20nm)-----97.5%





Hydroxyapatite Nano (40nm) --96%



Anexo 3. Ficha Técnica Hidroxiapatita de Calcio Comercial

Nota: Hidroxiapatita para uso industrial, farmacéutico o químico, importado por Osmopurif Water



FILTRO MULTIMEDIA 9" x 48"

Filtro de Lecho Profundo de 1 ft³, con flujo de 16 a 21 litros por minuto.

DESCRIPCIÓN

Sistema Multimedia con filtro de lecho profundo (antracita, arena y grava) o filtros de zeolita.

APLICACIONES

- Filtración de sedimentos suspendidos en el agua potable.
- Plantas purificadoras de agua
- Llenadoras de garrafones
- Filtración doméstica
- Lava autos
- Hoteles
- Restaurante
- Hospitales



ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL PRODUCTO

Tanque:	Polyglass 9" diámetro x 48" altura
Volumen del medio filtrante:	1 ft ³ , Multimedia (antracita, arena y grava) o zeolita
Volumen del tanque:	1.58 ft ³
Área del tanque:	0.44 ft ²
Flujo excelente:	16.72 LPM, (4.42 GPM)
Flujo normal:	20.90 LPM, (5.52 GPM)
Flujo pico:	25.10 LPM, (6.63 GPM)
Flujo de Retrolavado:	9.20 LPM
Válvulas	
(a) Multi-válvula manual, Conexión 1"	
(b) Pentair 363, Conexión 1"	
(c) Clack SW1 electrónica, Conexión 1"	
(d) Performa 263/268, Conexión 1"	
(e) Manifould, Conexión 3/4"	

Anexo 4. Ficha Técnica Lecho Profundo 9"x48"

Nota: Lecho profundo 9"x 48" incluye accesorios (difusores)

AVALCHEM S.C.C.

Ingeniería en Tratamiento de Aguas
RUC:
1792431425001

Panamericana Norte Cda. Alegria calle B 7 casa N° 87
Telefax: 2822 -734 Telef. 2020-717
Cels: 0999 660 149 - 0999 660 159
Quito - Ecuador
email: avtech@andinasnet.net

Polímeros Filtrantes, Arenas
y Gravas
Carbon Activado, Clore, Anticloro,
Bactericida, Detergente y
Desinfectante
Material de Laboratorio, equipos

GRAVAS CANTO RODADO

PARÁMETRO:

UNIDAD:

Coefficiente de uniformidad	< 2.00
Solubilidad en HCL	< 5%
Dureza (moHS)	6
Peso Especifico	> = 2,5
Densidad Aparente	1,35 - 1,45 g/ml

Tamaño gravas:	1 1/2 x 3/4" (1,8-3,5cm)
	3/4 x 1/2" (1,2-1,8cm)
	1/2 x 1/4" (0,6-1,2cm)
	1/4 x 1/8" (0,3-0,6cm)
	1/8x1/16" (0,2-0,3cm)

Las gravas cumplen la Norma INEN 2149:98 de medios filtrantes granulares utilizados en el tratamiento de aguas.

USOS.- se utiliza como medio filtrante para depuración de agua potable, aguas residuales, agua envasada.

ALMACENAMIENTO.- Se recomienda almacenar en un ambiente seco, el producto no tiene fecha de caducidad.

SEGURIDAD Y MANIPULACIÓN.- Se recomienda el uso de mascarilla, por la generación de polvo de sílice en la manipulación.

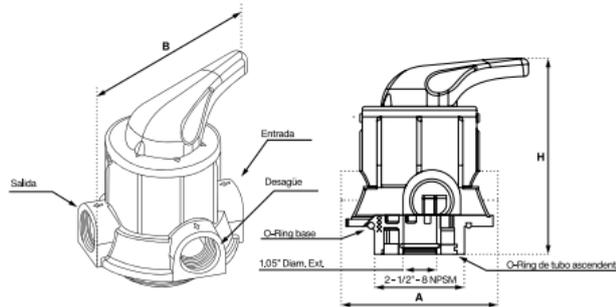


AVALCHEM S.C.C.
RUC: 1792431425001

Anexo 5. Ficha Técnica Grava Homogénea Lavada

Nota: Producto distribuido por Avalchem, Ecuador para tratamiento de aguas.

Medidas



Cota	Medida
A (mm) Máx.	126
B (mm) Máx.	150
H (mm) Máx.	158

Instalación

A. Instalación

Antes de la instalación, lea estas instrucciones detenidamente y consiga todo el material necesario para la instalación.

La instalación de este producto y lo necesario debe ser realizada por un profesional para asegurar que la válvula opere con normalidad.

Tome en cuenta las especificaciones de la entrada, salida y desagüe de la válvula al momento de realizar las labores de tubería.

B. Ubicación de la válvula

1. El filtro debe estar cerca del drenaje
2. Asegurese que la unidad esta instalada en un lugar con suficiente espacio para su operación y mantenimiento.
3. Aleje la válvula de fuentes de calor, no la exponga a la intemperie. El sistema es propenso a daños si se expone al sol o a la lluvia.
4. No se instale en un lugar donde la temperatura pueda bajar menos de 5°C o pueda incrementar a más de 50°C.

Anexo 6. Ficha Válvula manual para filtro Purago

Nota: Válvula para regular la entrada, lavado y retrolavado de lecho.



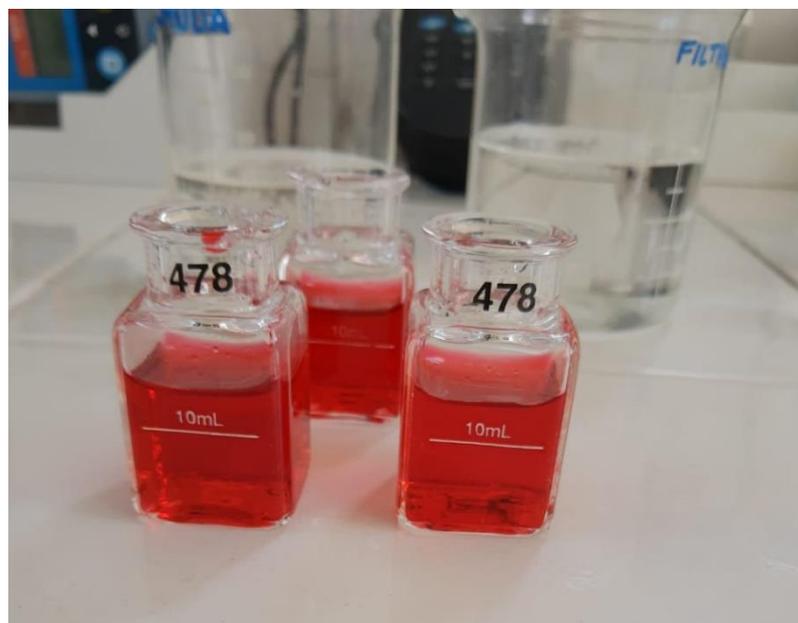
Anexo 7. Planta de Tratamiento JAPS Totoras

Nota: En dicha planta se capta el agua para la posterior filtración y desinfección.



Anexo 8. Lecho Fluidizado con Hidroxiapatita de Calcio

Nota: Sistema diseñado para flujo continuo de tratamiento *in situ*.



Anexo 9. Ensayos experimentales de muestras antes y después del Tratamiento

Nota: Aplicación del método HACH 8029 a 580 nm programa 190.