

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FILTRACIÓN PARA LA
REMOCIÓN EFECTIVA DE ARSÉNICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE, CASO DE ESTUDIO: EMPOCABAL ESP.

LAURA DANIELA MARTÍNEZ MONTES

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2022

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FILTRACIÓN PARA LA
REMOCIÓN EFECTIVA DE ARSÉNICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE, CASO DE ESTUDIO: EMPOCABAL ESP.

LAURA DANIELA MARTÍNEZ MONTES

Trabajo de grado

Para optar por el título de ingeniera ambiental e ingeniera civil.

Director: Andrés Felipe Martínez Urrego - Ingeniero Químico

Codirector: Fabio Eduardo Díaz López - Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2022

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado.

Firma del jurado.

Firma del jurado.

Bogotá, Julio de 2022.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a Dios que sin Él no sería posible estar en este lugar, a mis padres por su constante apoyo, por cada día luchar junto a mí por obtener mis títulos profesionales, a mis hermanos por motivarme, aconsejarme y apoyarme siempre, a toda mi familia, abuelos, tíos y primos por estar presente en todo momento, a mis amigos y compañeros con quienes tuve la oportunidad de compartir y apoyarnos mutuamente por esta meta, a mis directores por confiar en mí, a mis docentes por su conocimiento y dedicación constante a lo largo de estos años, por último a mi abuelo en el cielo, mi apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres quienes siempre me apoyaron a lo largo de estos años y especialmente en que este proyecto para que se desarrollara de la mejor manera.

A los docentes Andrés Felipe Martínez Urrego y Fabio Eduardo Díaz López por su guía, acompañamiento y por brindarme sus conocimientos y su tiempo.

A todos y cada uno de los docentes de las facultades de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil por extender su conocimiento en todas las ocasiones, por su paciencia y dedicación, por brindar un apoyo constante.

A los laboratoristas de la Universidad Santo Tomás, quienes siempre tuvieron una excelente disposición para el préstamo de equipos y uso del laboratorio de tratamiento de aguas.

Para terminar, agradezco a la Universidad Santo Tomás y todas las personas involucradas en cada proceso, por la gestión que desempeñan y los espacios brindados.

CONTENIDO

pág.

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	16
1.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. ANTECEDENTES	17
3. MARCO TEÓRICO.....	20
3.1. MARCO CONCEPTUAL	20
3.1.1. ARSÉNICO	20
3.1.2. TOXICIDAD E IMPLICACIONES SOBRE LA SALUD DEL ARSÉNICO	20
3.1.3. TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.....	21
3.1.4. PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA.....	23
3.1.5. COGULANTES	24
3.1.6. pH	24
3.1.7. TEMPERATURA	25
3.1.8. IBM SPSS	25
3.2. MARCO CONTEXTUAL.....	25
3.2.1. FUENTE DE ABASTECIMIENTO CAMPOALEGRITO	25
3.2.2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EMPOCABAL ESP 26	
3.2.3. CARACTERÍSTICAS DEL KIT QUANTOFIX ARSENIC SENSITIVE.....	27
3.2.4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS	27
3.3. MARCO LEGAL	28
4. METODOLOGÍA	30
4.1. FASE I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	30

4.2.	FASE II. PROTOCOLO DE MUESTREO	30
4.3.	FASE III. MUESTREO	31
4.4.	FASE IV. DISEÑO DE PRUEBAS DE TRATABILIDAD	31
4.5.	FASE V. ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	31
4.5.1.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO IBM SPSS	34
4.6.	FASE VI. PLAN DE MEJORA	35
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	37
5.1.	FASE I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	37
5.2.	FASE II. PROTOCOLO DE MUESTREO	37
5.3.	FASE III. MUESTREO	44
5.3.1.	CADENA DE CUSTODIA	45
5.4.	FASE IV. DISEÑO DE PRUEBAS DE TRATABILIDAD	46
5.5.	FASE V. ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	47
5.5.1.	MUESTRA INICIAL.....	47
5.5.2.	PRUEBA DE JARRAS.....	51
5.5.3.	COAGULANTE 1 (PAC).....	53
5.5.4.	COAGULANTE 2 (SULFATO DE ALUMINIO)	57
5.5.5.	COAGULANTE 3 (CLORURO FÉRRICO).....	61
5.5.6.	REPETICIÓN MUESTRAS ACEPTABLES	64
5.5.7.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO IBM SPSS	70
5.6.	FASE VI. PLAN DE MEJORA	71
5.6.1.	OPCIONES DE ATENUACIÓN DE RIESGOS	72
5.6.2.	MEJORA DE PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS	72
5.6.3.	INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO.....	72
5.6.4.	MEDIDAS DE UN PLAN DE MEJORA.....	72
5.6.5.	PLAN DE MONITOREO OPERATIVO.....	74
5.6.6.	COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN.....	74
6.	IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO.....	76
7.	CONCLUSIONES.....	77
8.	RECOMENDACIONES	79
9.	REFERENCIAS.....	80
	ANEXOS.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Instrumentos de medición.	28
Tabla 2. Marco legal.	29
Tabla 3. Tiempo de mezcla.	46
Tabla 4. Parámetros iniciales.	47
Tabla 5. Diagrama de número de muestras.	51
Tabla 6. Resultados de la concentración de arsénico PAC.	54
Tabla 7. Resultados del porcentaje de remoción de arsénico PAC.	55
Tabla 8. Comparación de la normatividad respecto a los resultados de arsénico PAC.	56
Tabla 9. Resultados de arsénico sulfato de aluminio.	57
Tabla 10. Resultados del porcentaje de remoción de arsénico sulfato de aluminio.	59
Tabla 11. Comparación de la normatividad respecto a los resultados de arsénico sulfato de aluminio.	60
Tabla 12. Resultados de arsénico cloruro férrico.	61
Tabla 13. Resultados del porcentaje de remoción de arsénico cloruro férrico.	63
Tabla 14. Comparación de la normatividad respecto a los resultados de arsénico cloruro férrico.	64
Tabla 15. Resultados de arsénico PAC de muestras aceptables.	65
Tabla 16. Resultados para coagulante IBM SPSS.	70
Tabla 17. Resultados para material filtrante IBM SPSS.	70
Tabla 18. Medidas de un plan de mejora.	73
Tabla 19. Plan de monitoreo operativo.	74
Tabla 20. Costos de implementación PAC y zeolita.	75
Tabla 21. Costos de implementación cloruro férrico y zeolita.	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Río Campoalegrito	25
Figura 2. Procesos PTAP EMPOCABAL ESP.	26
Figura 3. Recipiente con 100 mL de muestra.	32
Figura 4. Recipiente con As-I.....	32
Figura 5. Recipiente con As-II.....	33
Figura 6. Recipiente con As-III.....	33
Figura 7. Recipiente con la tira reactiva.....	34
Figura 8. Precipitación mensual multianual 2000-2020 Estación Termales 26130020.....	38
Figura 9. Precipitación mensual multianual 2000-2020 Estación San Remo 26135160.....	38
Figura 10. Precipitación mensual multianual 2000-2020 Estación Potrerros 26130170.....	39
Figura 11. Precipitación mensual multianual 2000-2020 Estación Playa Rica 26130540.....	39
Figura 12. Precipitación mensual multianual 2000-2020 Estación Pez Fresco 26130560.....	40
Figura 13. Ubicación estaciones hidrometereológicas.....	40
Figura 14. Polígonos de Thiessen estaciones hidrometereológicas.....	42
Figura 15. Diseño de toma de muestra.....	43
Figura 16. Ubicación bocatoma del río Campoalegrito	44
Figura 17. Zona de muestreo.....	45
Figura 18. Montaje de filtración.....	47
Figura 19. Resultado turbiedad junio.....	48
Figura 20. Resultado pH y T ^o junio.....	48
Figura 21. Resultado turbiedad julio.....	49
Figura 22. Resultado pH y T ^o julio.....	49
Figura 23. Resultado de la concentración de arsénico muestra inicial.....	50
Figura 24. Prueba de jarras PAC.....	52
Figura 25. Prueba de jarras sulfato de aluminio.....	52
Figura 26. Prueba de jarras cloruro férrico.....	52
Figura 27. Resultado concentración de arsénico muestra 1 PAC.....	53
Figura 28. Resultado concentración de arsénico muestra 3 PAC.....	54
Figura 29. Resultado concentración de arsénico muestra 1 sulfato de aluminio.	58
Figura 30. Resultado concentración de arsénico muestra 2 sulfato de aluminio.	58
Figura 31. Resultado concentración de arsénico muestra 3 cloruro férrico.....	62
Figura 32. Resultado concentración de arsénico muestra 4 cloruro férrico.....	62

Figura 33. Medición de pH muestra 3.	66
Figura 34. Medición de pH muestra 4.	66
Figura 35. Medición de pH muestra 9.	67
Figura 36. Prueba de jarras muestras aceptables.	67
Figura 37. Prueba de jarras muestras aceptables.	67
Figura 38. Resultado concentración de arsénico muestra 1 PAC.	68
Figura 39. Resultado concentración de arsénico muestra 4 sulfato de aluminio	68
Figura 40. Resultado concentración de arsénico muestra 5 cloruro férrico y zeolita.	69
Figura 41. Resultado concentración de arsénico muestra 7 cloruro férrico y carbón activado.	69

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1	88
---------------	----

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Costos coagulantes	75
Ecuación 2. Costo material filtrante	75

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la evaluación del proceso de coagulación-filtración para la remoción efectiva del arsénico en el agua para consumo humano, tomando como caso de estudio la Empresa de Obras Sanitarias de Santa Rosa de Cabal EMPOCABAL ESP. Para esto se realizó una revisión bibliográfica, se ejecutaron 18 pruebas de tratabilidad con los coagulantes policloruro de aluminio, sulfato de aluminio y cloruro férrico además de la repetición de las pruebas que resultaron óptimas. Como resultado se tienen las variables que intervienen el proceso de remoción de arsénico tales como pH, temperatura y dosis del coagulante, la remoción efectiva de arsénico con los coagulantes PAC y el cloruro férrico con porcentajes de remoción entre el 80% y el 100% haciendo uso de zeolita como material filtrante y finalmente, el planteamiento del plan de mejora con estimación de costos.

Palabras clave: remoción de arsénico, material filtrante, proceso, variables, coagulantes.

ABSTRACT

In this work, the evaluation of the coagulation-filtration process for the effective removal of arsenic in water for human consumption was carried out, taking as a case study the Empresa de Obras Sanitarias de Santa Rosa de Cabal EMPOCABAL ESP. For this purpose, a bibliographic review was carried out, 18 treatability tests were performed with the coagulants aluminum polychloride, aluminum sulfate and ferric chloride, in addition to the repetition of the tests that were optimal. As a result, the variables involved in the arsenic removal process such as pH, temperature and coagulant dosage, the effective removal of arsenic with PAC coagulants and ferric chloride with removal percentages between 80% and 100% using zeolite as filtering material and finally, the approach of the improvement plan with cost estimation.

Keywords: arsenic removal, filter material, process, variables, coagulants.

INTRODUCCIÓN

El arsénico (As) es el elemento químico número 33, perteneciente al grupo V, presente en la naturaleza y con fácil distribución en el aire, agua y suelo, conocido por ser uno de los metales más tóxicos en su forma inorgánica (As +5, As +3). Tiene diferentes orígenes, en procesos naturales, como la litología del material geológico y la oxidación de estos, procesos volcánicos, infiltración, lixiviación y procesos antrópicos presentes como la explotación minera, la quema de carbón, el uso de plaguicidas, fundición de metales industriales, entre otros. Estos procesos posteriormente aumentan la biodisponibilidad, la contaminación en aire y agua, proliferando o permitiendo su distribución al agua subterránea posiblemente en altas concentraciones (Pramanik et al., 2016).

La presencia de arsénico genera diferentes problemas de mayor magnitud, como lo son la incorporación a la cadena alimenticia debido al uso de esta agua para actividades de riego en el sector agrícola, el incremento en la dificultad del tratamiento de potabilización del agua para consumo humano y por ende afectación en la salud humana (OMS, 2018). La principal fuente de afectación para la salud se deriva del consumo de agua potable, por lo cual la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un límite máximo permisible de 0.01mg/L, esto conlleva a la implementación de diferentes procesos y tecnologías para su remoción y control como coagulación filtración, oxidación, adsorción con medios específicos, intercambio iónico, filtración por membrana, entre otros.

A pesar de la poca investigación, se sabe que en diferentes casos se ha encontrado presencia de arsénico en el agua para consumo humano que superan los límites permisibles establecidos tanto por la OMS como por la normatividad colombiana, en el 2017 en EMPOCABAL ESP, Empresa de Obras Sanitarias de Santa Rosa de Cabal, establece un plan de acción para la mitigación del riesgo de la calidad de agua para consumo humano, por la presencia de arsénico en la fuente Campoalegrito, en el que se establecen diferentes medidas a corto, mediano y largo plazo con un plazo máximo de 12 años, que tiene como objetivo cambiar la fuente de abastecimiento, según los reportes de la PTAP las medidas no son efectivas debido a que siguen presentando concentraciones considerables del metal (EMPOCABAL ESP, 2017).

El proceso de coagulación - filtración es habitualmente implementado en las plantas de tratamiento de agua potable para la remoción de partículas suspendidas y favoreciendo la disminución de turbiedad, por lo cual el objetivo de esta investigación es evaluar del proceso de coagulación - filtración para la remoción efectiva de arsénico en el tratamiento de aguas para el consumo humano, para ello se propone un plan de mejora el cual contenga a su vez la estimación de costos para tal proceso, partiendo de la importancia de la alta calidad en el agua de consumo humano para evitar problemas de salud pública, provenientes de fuentes naturales o intervenciones antrópicas.

Para el presente proyecto se toma como zona de muestreo el cuerpo de agua "Campoalegrito", para la obtención de datos reales que cumplan con las características de objeto del proyecto como lo son altas concentraciones de arsénico, con el fin de evaluar el proceso de coagulación - filtración para la remoción efectiva de este metal, bajo diferentes pruebas de tratabilidad llevadas a cabo con el kit "QUANTOFIX Arsenic Sensitive" de Macherey – Nagel, posteriormente se realizó un análisis para evaluar la mejor alternativa teniendo como coagulante cloruro férrico con porcentajes de remoción del 80% al 100% y zeolita como material filtrante, luego, basado en lo anterior se elaboró el plan de mejora, el cual incluye medidas en tratamientos específicos como el cambio de coagulante y del material filtrante, además de un plan de monitoreo y los costos de implementación.

Esta investigación servirá como referencia principal en la implementación de mejoras en el proceso de remoción de arsénico, siendo esta fuente de información para posteriores estudios, además de permitir una replicación del proceso en futuros estudios.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el proceso de coagulación - filtración para la remoción efectiva de arsénico en el tratamiento de agua para el consumo humano, tomando como caso de estudio el sistema de potabilización de EMPOCABAL ESP.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las variables que inciden en el proceso de coagulación-filtración con fines de remoción de arsénico, a través de un diagnóstico de la planta de potabilización de EMPOCABAL ESP.
- Estimar la eficiencia en remoción de arsénico para diferentes condiciones operativas en el proceso de coagulación-filtración, a través de pruebas de tratabilidad.
- Proponer un plan de mejora, con estimación de costos, para el proceso de coagulación - filtración de la planta de potabilización EMPOCABAL ESP con base en los resultados de las pruebas de tratabilidad.

2. ANTECEDENTES

Para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano, se han desarrollado diferentes investigaciones, teniendo en cuenta el enfoque del proceso de coagulación, esto debido a la gran importancia para la salud pública y el consumo de agua, por lo cual se realizó una búsqueda de diferentes estudios y se seleccionaron los más relevantes o representativos.

En primer lugar, según la Organización Mundial de la Salud, el arsénico en el agua y la exposición prolongada es de gran amenaza para la salud pública debido a que es implementado en actividades cotidianas como la preparación de alimentos, beber agua o el riego de cultivos (OMS, 2018). Partiendo de esto y de que es fundamental proporcionar a la población agua con aptas condiciones para su consumo y resaltando la importancia de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y un proceso consecutivo y óptimo, es necesario el uso de químicos que favorezcan estas etapas.

Por lo cual, se llevan a cabo estudios donde se analiza la posible eficiencia de la remoción de arsénico V en el agua mediante el uso de cloruro de polialuminio y aloe vera como coagulantes, teniendo en cuenta diferentes concentraciones y tiempos del proceso, además considerando variables operativas como lo es la dosis demostrando que es uno de los parámetros más importantes para que se desarrollen de manera eficiente los procesos de coagulación y floculación, y que a la vez no es proporcional la eliminación de arsénico con la dosis de coagulante, lo que no solo favorece la carga orgánica del agua sino también se resaltan los bajos costos de implementación, también se analizó la influencia del pH en la remoción de arsénico y se determinó que en promedio la remoción más alta se presenta en aguas con un pH de 6 (Bazrafshan, Mohammadi, et al., 2013). Por otro lado, Bazrafshan y Faridi abarcan el tema de métodos naturales para la eliminación de arsénico, en este caso, mediante el uso del extracto de la semilla de moringa, obteniendo remociones por encima del 90% y mostrando además que es un coagulante económico para el uso (Bazrafshan et al., 2013)

Mediante el uso de sales férricas Wang y Mondal proponen diferentes técnicas de remoción, en una de ellas se realizó un análisis de la relación que tiene el pH, manteniendo el valor entre 5 y 9 unidades de pH y como este puede contribuir a

su remoción (Wang et al., 2014). En este caso, se realizaron diferentes pruebas con una variedad de coagulantes como cloruro férrico y sulfato férrico, por medio de un tratamiento convencional y evaluando diferentes parámetros de calidad de agua, se obtienen mejores eficiencias mediante el uso del cloruro férrico en todos los valores de pH dentro del rango, mientras que para el sulfato férrico tuvo un efecto bajo en la remoción de arsénico que puede verse relacionado por la competitiva adsorción de los iones (Mondal et al., 2021). También se establece que la remoción con mayor eficiencia (99%) se relaciona con el pH de 7, mientras que a medida que los valores de pH aumentan la eficiencia de remoción disminuye significativamente empleando cloruro férrico.

Asimismo, Kumar y Quaff hicieron uso del cloruro férrico como coagulante comercial para la eliminación del arsénico en el agua, pero además a este coagulante hicieron uso de biopolímeros naturales los cuales arrojaron valores hasta de 85% de remoción y se observó que el pH es capaz de mantenerse en un rango entre 6 – 8 unidades de pH, un valor muy alto o bajo de este afecta la remoción de arsénico teniendo las eficiencias más bajas, demostrando que un pH de 7 presenta la mayor efectividad en el proceso y con el uso de cloruro férrico se logró encontrar la dosis óptima y se concluyó que mayores dosificaciones de coagulante no aseguran una mayor remoción (Kumar & Quaff, 2019). De la misma forma se realizaron prácticas con sulfato de aluminio para diferentes tipos de muestras y concentraciones donde se presenta un rango del pH entre 3 -5 unidades de pH fue cerca del 80% mientras que usando cloruro férrico la eficiencia de remoción fue aproximadamente 95%, asegurando también que para conseguir mayores porcentajes de remoción se deben emplear menores dosis de coagulantes (Francisca & Carro Pérez, 2014).

Por último, se tienen el aporte de Laky y Licskó, que se desarrolla mediante el uso cloruro férrico un análisis de la presencia de fosfatos, carbonatos y silicatos y como estos puede favorecer o afectar el proceso de remoción de arsénico, además de la influencia del pH, teniendo como resultado que un factor como lo es el pH es de gran importancia, tanto en la influencia de parámetros como el silicato como en la remoción de arsénico, por lo que se mantuvo un rango entre 7.55 a 7.8 unidades de pH y también dosis diferentes de coagulantes con lo que se determinó que una gran cantidad no sólo afecta el contenido de arsénico, es decir, que no se elimina de manera eficiente sino que también en la presencia de silicatos en el agua, lo que afecta de manera directa el contenido de arsénico (Laky & Licskó, 2011).

En Latinoamérica, se reconoce que 14 países poseen este problema de salud pública y que además ya se encuentran en la implementación de la mejor alternativa para el tratamiento y disminución de la exposición a la comunidad, teniendo en cuenta aspectos como los costos y espacio disponible para la implementación, por otro lado, en Colombia se cuenta con poca información del arsénico en agua para el consumo humano pero debido a diferentes investigaciones de geología e hidrogeología se ha logrado determinar que departamentos como Tolima, Caldas y Nariño están propensos a encontrar altos porcentajes de arsénico en el agua subterránea que conduce luego a fuentes superficiales (Alonso et al., 2014)

En EMPOCABAL ESP se determinaron diferentes estrategias para la remoción de arsénico en la fuente de abastecimiento principal del municipio de Santa Rosa de Cabal, esto debido a la presencia del metal por las condiciones naturales de la zona, como lo son los termales, que superan los límites permisibles establecidos por la normativa colombiana y la OMS. Algunas estrategias propuestas a corto plazo incluyen la dilución del contenido de arsénico con otra fuente hídrica, cambio de los lechos filtrantes y la instalación de procesos que favorezcan la remoción de arsénico, de las medidas planteadas para mediano plazo se tienen proyectadas actividades como la construcción de una unidad paralela al desarenador y diferentes pruebas con polímeros sintéticos, por último, a largo plazo se establece el cambio de la bocatoma (EMPOCABAL ESP, 2017).

A pesar de las diferentes estrategias planteadas la empresa continúa presentando variedad en los valores de arsénico en el agua a que algunos sobrepasan el límite permisible, como en la bocatoma donde se presentan resultados de 0.181 mg/L cuando se presentaban valores de referencia de 0.05 mg/L además de la poca aplicación de estas actividades al interior de la planta (EMPOCABAL ESP, 2017). Por otro lado, el Instituto Nacional de Salud, en su informe de calidad del agua para consumo humano del 2020 reporta presencia de arsénico en el departamento de Risaralda (INS, 2020).

3. MARCO TEÓRICO

3.1. MARCO CONCEPTUAL

3.1.1. ARSÉNICO

El arsénico es un elemento químico con alta biodisponibilidad en la corteza terrestre, es clasificado como un metaloide, presenta diferentes propiedades tanto de metal como de elemento no metálico, en el ambiente se presenta de manera orgánica e inorgánica, la primera es cuando se encuentra combinado con carbono e hidrógeno y la segunda con la combinación de elementos como el oxígeno, cloro y azufre, además arsénico inorgánico naturalmente está en el suelo y en muchos tipos de rocas, especialmente en minerales que contienen cobre o plomo, en el aire y el agua, ya sea por escorrentía o por agua que se filtra por el suelo (ATSDR, 2007). A pesar de que algunos metales se encuentren de manera natural en el medio ambiente, el incremento de estos se ve relacionado con intervenciones y actividades antrópicas, como lo son la minería, procesos industriales y el uso de combustibles fósiles (Eslami et al., 2022).

El arsénico se encuentra en la naturaleza en estados de oxidación -3, +3 y +5, los trivalentes son conocidos como los arsenitos y los pentavalentes como los arseniatos, en las aguas naturales hay una mayor interacción del As +3; la presencia de un metal como el arsénico en el agua para consumo humano puede generar consecuencias o efectos adversos en la salud humana, (World Health Organization, 2008)

3.1.2. TOXICIDAD E IMPLICACIONES SOBRE LA SALUD DEL ARSÉNICO

Las características del arsénico lo convierten en un elemento de alta toxicidad, pero depende de diferentes factores como lo son su forma, es decir, orgánica o inorgánica, su valencia, solubilidad y su pureza; con lo anterior, se sabe que los compuestos de arsénico con mayor toxicidad son inorgánicos, es decir, los trivalentes y los pentavalentes (ATSDR, 2007).

Respecto a la salud humana, el arsénico es un elemento altamente tóxico, afecta directamente a todos los sistemas y aparatos del cuerpo humano, siendo la piel uno de los lugares donde se evidencia con mayor rapidez y facilidad la presencia del arsénico manifestándose como hiperpigmentación irregular, hiperqueratosis y queratosis, algunos efectos en la salud son neuritis periférica, que consiste el debilitamiento de las extremidades, lesiones hepáticas, puede generar daños

gastrointestinales como gastroenteritis hemorrágica. Por otro lado, también genera efectos cardiovasculares como enfermedad vascular periférica, hipertensión y cardiomiopatías, entre otros efectos negativos en la salud en todo el cuerpo humano, además el cáncer de piel, pulmón y vejiga que provocan una ingesta crónica del meta. (ATSDR, 2011)

Además, al ser un elemento altamente tóxico y carcinógeno, cabe aclarar que no solo afecta en altas concentraciones a la salud humana, sino que, una exposición frecuente, como lo es el consumo de agua diario o la implementación de esta en aguas actividades conllevan a que efectos agudos se presenten de manera más rápida, sabiendo esto, es importante el análisis de las fuentes de abastecimiento con el fin de identificar concentraciones que afecten la salud humana. (Centro de investigación en materiales avanzados, 2013)

3.1.3. TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

Se define como un conjunto de obras, que tiene como fin brindar agua de buena calidad y de manera eficiente a la comunidad para diferentes fines, ya sea doméstico, industrial, educativo, entre otros (Concha & Guillén, 2014), se construyen cerca de cuerpos de agua con el fin de someterla a una serie de procesos y que esta sea óptima para el consumo humano, estos tratamientos permiten la eliminación de contaminantes, residuos, lodos y demás, al interior de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) se tratan diferentes características del agua como el color, la turbiedad, dureza, pH, entre otros (Acuatecnica S.A.S, 2016).

Existen diferentes tipos de PTAP, se pueden clasificar en convencionales o de ciclo completo, no convencionales, que también pueden ser de filtración directa, filtración en línea y filtración por etapas (Acuatecnica S.A.S, 2016). Las plantas convencionales, son aquellas que reciben en su punto de captación agua cruda, se potabiliza y finalmente se distribuye en la red a los consumidores, así mismo, dentro de esta clasificación se presentan por gravedad o por bombeo, en el primer caso no requieren tratamientos para mejorar su calidad, sino que ya cuenta con las características suficientes para ser apta para consumo humano, por otro lado, las plantas de agua potable por bombeo se enfocan en diferentes etapas de tratamiento como pretratamiento, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, cloración o desinfección y finalmente distribución a los consumidores (Camacho & Peña, 2018).

Este último, es comúnmente implementado por poblaciones grandes, que requieren de estos tratamientos para acceder a un recurso óptimo para su consumo, los costos están asociados a las características del cuerpo de agua y a las que se pretende llegar, además de la complejidad de los mismos, pueden ser tratamientos primarios o fisicoquímicos donde se elimina la mayor cantidad posible de partículas suspendidas, tratamientos secundarios en los que la materia presente en el agua que no fue retirada en el tratamiento fisicoquímico por tener características diferentes se elimina completamente, por último, el tratamiento terciario, contaminantes orgánicos no biodegradables están presentes por condiciones específicas de lugar, los dos primeros procedimientos son comunes en plantas de tratamiento de tipo convencional, pero el último se debe aplicar en casos especiales de manera específica dependiendo de la clase de contaminante presente en el agua (Caminati & Catherine, 2013).

Es de vital importancia que una población cuente con agua potable pues la salud y el bienestar de los habitantes se ve mejorada, además de reflejar el desarrollo de un país (Dinka, 2018). Para ello se desarrollan diferentes procesos que buscan alcanzar condiciones óptimas del agua para el consumo humano, pero debido al constante crecimiento de la población y las actividades cotidianas, traen consigo una mayor complejidad para cumplir con diferentes estándares o normativas (Chulluncuy, 2011).

Las plantas de tratamiento de agua no convencionales no son sistemas a gran escala o que cumplan con el objetivo de abastecer a una población numerosa, sino que más bien poblaciones que no tienen acceso a una red de distribución y que claramente requieren contar con agua potable, por medio de transporte buscan encontrar agua óptima y si es necesario aplicar sus propios métodos de desinfección (Camacho & Peña, 2018).

Un tipo de tratamiento de agua potable que se adecua a poblaciones pequeñas o con difícil acceso a la zona son las plantas compactas, estas contienen un sistema integrado en varias etapas que convierten el proceso en algo sencillo y con un espacio reducido, tiene algunas complicaciones como el cumplimiento de turbiedad en ocasiones o también el color por precipitaciones fuertes y constantes (Díaz, 2017).

3.1.4. PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA

- **PRETRATAMIENTO:** este proceso incluye un cribado inicialmente, con el fin de eliminar grandes sólidos y arenosos que pueden afectar el mantenimiento de los equipos en procesos siguientes, en este proceso son empleadas rejillas, tamices y desarenadores (Caminati & Catherine, 2013), además se puede llevar a cabo una desinfección con cloro para la eliminación de bacterias y virus, brindando un control biológico, la eliminación de hierro y manganeso (Spena Group, 2016)
- **COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN:** el proceso de coagulación es uno de los más importantes en el planteamiento de la potabilización del agua, ya que mediante una mezcla rápida se integra un coagulante, que normalmente pueden ser sales de hierro o de aluminio, con una dosis específica, con el fin de que en el proceso se desestabilicen los iones por una reducción de las fuerzas que la repelen y que se permita su agrupación para que así se formen flóculos o flocs más fáciles de remover, al tener una mejor dispersión del coagulante se puede tener aumentan la posibilidad de aglomeración de las partículas por lo que el proceso se vuelve mucho más eficiente (Hernández & Corredor, 2017). En este proceso intervienen diferentes factores como la dosis del coagulante y el pH, por otro lado, se eliminan características como la turbiedad, color, la eliminación de bacterias o virus y de partículas que afectan el olor y sabor del agua (Caminati & Catherine, 2013).

La floculación consiste en el proceso de la formación de partículas sedimentables, esto es causado por el comportamiento inestable de los iones, cabe aclarar que lo que conlleva durante el proceso de coagulación que se formen estos flocs pueden ser puentes químicos, sobresaturación de la concentración por adsorción, consiguiendo que las diferentes partículas que chocan alcanzan el tamaño suficiente para sedimentarse por gravedad (Hernández & Corredor, 2017)

- **SEDIMENTACIÓN:** posteriormente, las partículas o flocs más pesados se sedimentan por efecto gravitacional para finalmente ser eliminados, estos deben tener un peso específico mayor al agua que se encuentra en el tratamiento (Zarza, s.f.) . Mientras más densa se encuentre la partícula, más rápida y sencilla será su sedimentación, en este proceso influyen algunos procesos como lo son la velocidad de sedimentación, que debe ser nula, esto debido a que en el proceso se espera que las partículas ya formadas gracias a la gravedad cumplan su proceso, por ellos en las plantas de tratamiento de agua potable es importante la elección de equipos adecuados ya sean de flujo vertical o flujo horizontal, teniendo siempre las respectivas recomendaciones como limpieza y extracción

de lodos para que su efectividad no se vea afectada (Hernández & Corredor, 2017).

- **FILTRACIÓN:** a pesar de que una gran parte del material suspendido es eliminado en etapas anteriores del tratamiento, existen diferentes contaminantes que por absorción son removidos pasando así por un material filtrante o medio poroso, los filtros que se emplean deben tener un alto porcentaje de efectividad, esto debido a que en esta fase se retienen también ciertos microorganismos que influyen en la calidad del agua (Caminati & Catherine, 2013). Esta efectividad es de mucha importancia, debido a que con el paso del tiempo se pierde la tasa de remoción deseada así que los filtros retienen menor material o permiten el paso de partículas suspendidas por pérdida de absorción del material en uso, para ello es importante realizar el lavado de los filtros con el fin de conservar su eficiencia y obtener altas tasas de remoción, este lavado es llevado a cabo mediante flujo ascendente permitiendo el desprendimiento de todas las partículas que puedan estar allí depositadas (Hernández & Corredor, 2017).

- **DESINFECCIÓN DEL AGUA:** se lleva a cabo una desinfección final con cloro para la eliminación de bacterias, virus o patógenos, este último proceso garantiza la calidad del agua desde el punto microbiológico (Zarza, s.f.).

3.1.5. COGULANTES

- **PAC:** el policloruro de aluminio (PAC) es un compuesto químico que resulta de una reacción exotérmica entre cualquier sal de aluminio y ácido clorhídrico, es un polvo blanco a amarillo oscuro (Kern s&d, 2020).

- **SULFATO DE ALUMINIO:** el sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), es obtenido a partir de la reacción entre un mineral de aluminio y ácido sulfúrico a temperaturas elevadas, se encuentra de manera sólida y líquida (SIDESA, 2020).

- **CLORURO FÉRRICO:** el cloruro férrico ($FeCl_3$) que se obtiene de la reacción del cloro con el hierro en temperaturas altas (Química.es, 2022).

3.1.6. pH

Se define como la concentración de iones de hidrógeno presentes en un cuerpo de agua, abarca una medida de acidez de 0 – 7 unidades de pH y una medida

de alcalinidad de 7 a 14 unidades de pH, los cambios constantes de pH pueden alterar la concentración de sustancias dentro del agua, para el consumo humano se recomiendan valores entre 5.5 a 9 unidades de pH (Water Boards California).

3.1.7. TEMPERATURA

La temperatura del agua se relaciona directamente con la temperatura ambiente en el lugar, se recomienda tener temperaturas bajas o medias, debido a que las temperaturas altas pueden contribuir a la proliferación de microorganismos y posteriormente ocasionar problemas en el olor o sabor del agua (WHO, 2011).

3.1.8. IBM SPSS

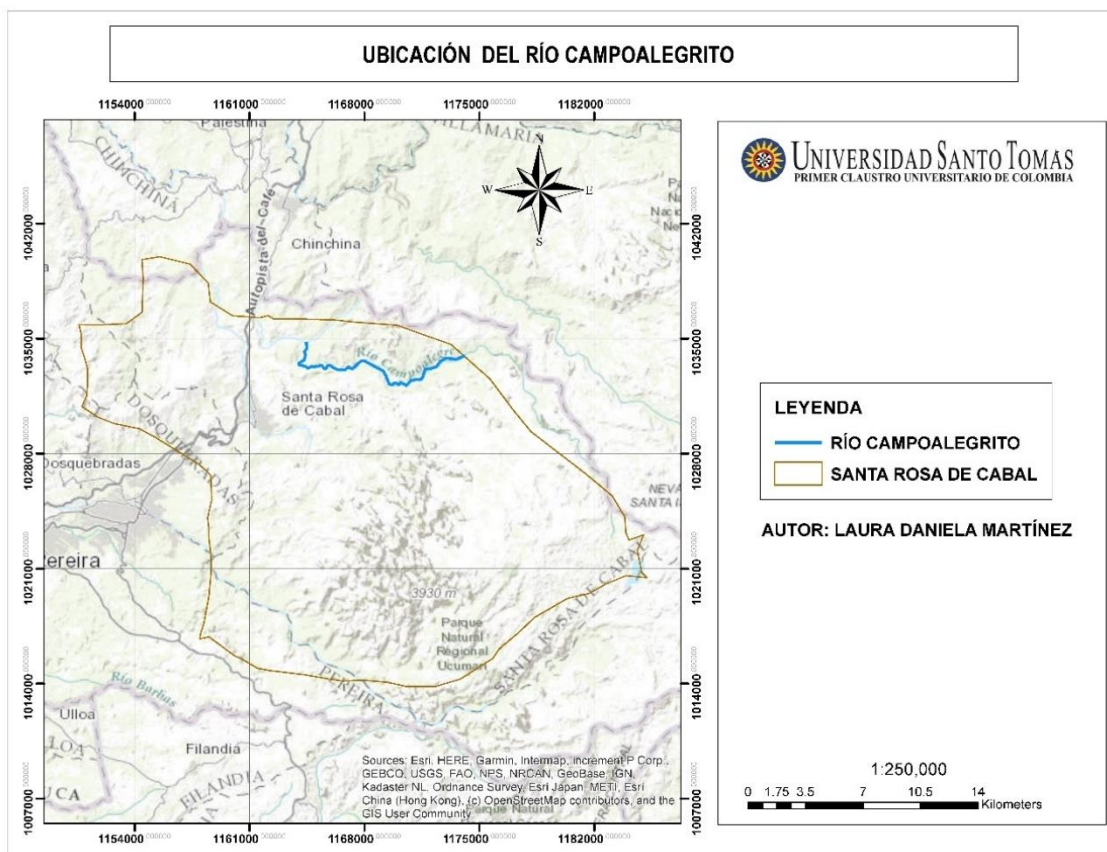
Statistical Package for Social Science, es un programa estadístico que permite el análisis de variables de manera rápida y sencilla, generando y transformando bases de datos y llevándolas a análisis estadísticos que se ajustan a diferentes tipos de proyectos (Universidad de Talca).

3.2. MARCO CONTEXTUAL

3.2.1. FUENTE DE ABASTECIMIENTO CAMPOALEGRITO

Se encuentra ubicado en el departamento de Risaralda, uno de los departamentos con mayor turismo y además gran desarrollo en el comercio, en el municipio de Santa Rosa de Cabal con una población de 111.000 habitantes, con características turísticas importantes como lo son los termales, la empresa prestadora de servicios públicos es EMPOCABAL ESP cuenta con aproximadamente 22.000 suscriptores entre los municipios de Santa Rosa de Cabal y parte de Dos Quebradas. La longitud de cauce es de 17 km y el área que posee es de 495 m², su temperatura promedio son 16°C y maneja un caudal de 500 l/seg posee suelos que son usados en la ganadería y que limitan a bosque natural del Parque Nacional Natural Nevados, a continuación, se presenta la ubicación el Río Campoalegrito .

Figura 1. Ubicación Río Campoalegrito



Fuente propia

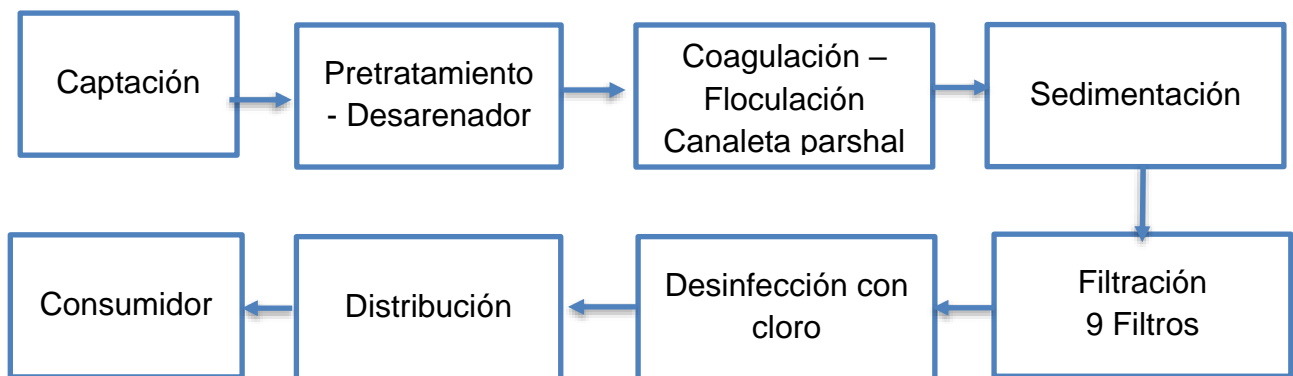
3.2.2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EMPOCABAL ESP

La PTAP de EMPOCABAL ESP trabajo de manera convencional, es decir, con todos los procesos desde pretratamiento, en el que contiene un desarenador, su principal fuente de abastecimiento es el río Campoalegrito en el proceso de coagulación emplean sulfato de aluminio y se realiza por medio de una canaleta parshall y una dosificación entre los 20 – 40 mg/ L, en el área de filtración cuentan con 9 filtros, hasta la desinfección (EMPOCABAL ESP, 2017)

- **PROCESOS**

A continuación, se presentan los procesos llevados a cabo por la PTAP EMPOCABAL ESP, desde la captación hasta que llega al consumidor.

Figura 2. Procesos PTAP EMPOCABAL ESP.



Fuente propia

3.2.3. CARACTERÍSTICAS DEL KIT QUANTOFIX ARSENIC SENSITIVE

Este kit funciona para la detección de arsénico en el agua, maneja un rango entre 0.005 y 0.5 mg/L de As +3 y +5, por medio de los reactivos identificados como As – I, 125 g As – II (ácido amino sulfónico) y 250 g As – III (zinc en polvo), el primero es líquido y los restantes en polvo. El procedimiento se lleva a cabo por medio de un proceso de agitación posterior a la agregación del reactivo en la muestra, siguiendo la guía proporcionada por el kit; este trae consigo como resultado la liberación de hidrógeno y arsano por lo que se debe realizar en espacios con suficiente ventilación, luego con la ayuda de las tiras que están compuestas por bromuro de mercurio III, celulosa, película de PVC y permanganato de potasio, se determinará la cantidad de As presente en el agua. Dependiendo de este resultado pueden pasar de blanca a marrón amarillento, siendo este último color indicativo de la mayor concentración de arsénico presente que sería 0.5 mg/L según el máximo mostrado por el kit, esto se puede determinar gracias al método Gutzeit modificado, originalmente el método mencionado consiste en liberar una corriente de hidrogeno permitiendo así que los compuestos de arsénico se reduzcan a arsano y de acuerdo al color resultante debido a la reacción del nitrato de plata se determina el As +3 y As +5 (Macherey – Nagel, 2017)

3.2.4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS

Se tuvieron dos instrumentos de medición para el desarrollo del proyecto, un medido de pH y un espectrofotómetro, el equipo empleado fue el test de jarras.

Tabla 1. Instrumentos de medición.

INSTRUMENTO O EQUIPO	DESCRIPCIÓN
<p data-bbox="316 376 711 443">HI 2211 Medidor de pH de sobremesa</p> 	<p data-bbox="885 376 1377 591">Es un medidor de mesa para pH y °C, realiza la medición para la concentración de iones (ISE) y la Oxidación Reducción Potencial (ORP) en el rango mV (Hanna Instruments, s.f.).</p>
<p data-bbox="316 788 826 855">Espectrofotómetro NANOCOLOR UV/VIS II, 190–1100 nm</p> 	<p data-bbox="885 788 1430 1003">Es un instrumento de alta precisión aplicable en todas las áreas de análisis de aguas de la marca MACHEREY-NAGEL, empleado en el proyecto para obtener el valor de turbiedad (MACHEREY-NAGEL, s.f.).</p>
<p data-bbox="316 1214 528 1247">Test de jarras</p> 	<p data-bbox="885 1214 1414 1429">Se emplea con el fin de simular las etapas de coagulación y floculación de un PTAP, está conformado por 6 batidores y un motor para ajustar las revoluciones por minuto (rpm) a las que estos girarán (DISIN S.A, s.f.).</p>

Fuente propia

3.3. MARCO LEGAL

Colombia cuenta con una serie de normativa encargada de regular factores ambientales que perjudiquen la salud ambiental y humana, a nivel global se

tendrá en cuenta el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater para la conservación de muestras:

Tabla 2.Marco legal

NORMA	OBJETIVO
<p>Constitución política de Colombia de 1991</p> <p>Asamblea Nacional Constituyente</p> <p>Art 79. Art. 80.</p>	<p>Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo.</p> <p>Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución (Asamblea Nacional Constituyente, 1991).</p>
<p>Decreto 1575 de 2007</p> <p>Ministerio de la Protección Social</p>	<p>El objeto del decreto es establecer el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada (Ministerio de Protección Social, 2007).</p>
<p>Resolución 2115 de 2007</p> <p>Ministerio de la Protección Social</p> <p>Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial</p> <p>Art. 5</p>	<p>Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano</p> <p>Artículo 5º. Características químicas de sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana. Arsénico As 0,01 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).</p>
<p>Standard Methods 1060</p> <p>COLLECTION AND PRESERVATION OF SAMPLES</p>	<p>Se establece la recogida y conservación de las muestras a las que se les realizarán análisis químicos, toxicológicos o microbiológicos, se establece que los recipientes deben estar libres y limpios, además que para metales lo envases pueden ser ya sea de vidrio, plástico o fluoropolímero, por otro lado, para la preservación de la muestra, esta debe ser filtrada inmediatamente y luego debe mantenerse refrigerada (Standard Methods, 2018).</p>

Fuente propia

4. METODOLOGÍA

El enfoque de esta investigación es mixto de manera que se tuvieron aspectos cuantitativos y cualitativos, por lo que el diseño metodológico estuvo dado por fases investigativas que articularon las actividades del proyecto a los objetivos de la investigación, este comenzó con la fase de revisión bibliográfica y contextualización del arsénico en el agua para consumo humano, posteriormente se hizo el diseño experimental como lo es la toma de muestra para la elección del coagulante y parámetros para el desarrollo de las pruebas de tratabilidad, finalmente con base en los resultados obtenidos, se analizó por medio de la herramienta IBM SPSS y se obtuvieron conclusiones del tema para el desarrollo del plan de mejora.

4.1. FASE I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La etapa inicial se enfocó en la búsqueda y revisión de bibliografía relacionada con el arsénico en el agua para consumo humano y el proceso de coagulación-filtración aplicado a este caso, posteriormente, se buscó identificar los procesos u operaciones presentes en EMPOCABAL ESP y bajo qué condiciones trabaja en general la planta y detectar qué variables influyen en que el proceso de remoción de arsénico no sea el esperado.

4.2. FASE II. PROTOCOLO DE MUESTREO

Luego de esto, se realizó el diseño de la toma de muestra, sabiendo que se deben estipular medidas para la toma y preservación de esta, se tuvo en cuenta la guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM, el cual plantea que el muestreo manual se lleva a cabo en lugares de fácil accesibilidad y es apto cuando se realizarán estudios para criterios de control y vigilancia (IDEAM, 2002)

En cuanto la elección del envase y preservación de la muestra, por medio del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, se estableció la recogida y conservación de las muestras a las que se les realizaron análisis químicos, toxicológicos o microbiológicos, se determinó que los recipientes deben estar libres y limpios, además que para metales los envases pueden ser ya sea de vidrio, plástico o fluoropolímero, por otro lado, para la preservación de la muestra, esta debe ser filtrada inmediatamente y luego debió mantenerse refrigerada (Standard Methods, 2018).

También se realizó la elección de una época del año donde se presentan promedios de precipitación bajos o moderados para no causar alteraciones en las concentraciones de arsénico de la muestra estudio, esto se hizo a partir de la elección de las estaciones hidrometereológicas pertenecientes al municipio, en un periodo de 20 años, es decir, de 2000 a 2020 con lo que se obtuvo el análisis multianual de precipitación.

En cuanto al tamaño de muestra y número de muestra, el primero fue según el Standard Methods para lograr su conservación y preservación se estipuló que la muestra debe ser de 1000 mL con filtración inmediata como se menciona anteriormente, siguiendo estas características se permitiría una conservación de la muestra de 6 meses, para el caso del número de muestra se tuvo en cuenta la facilidad de transporte de Santa Rosa de Cabal – Bogotá.

4.3. FASE III. MUESTREO

Después se efectuó la toma de muestras, esta se llevó a cabo en la fuente de abastecimiento “Campoalegrito” en el mes con menos variación respecto a precipitación y temperatura, con el fin de que la concentración de arsénico no se viera diluida por las condiciones de lluvia elevadas, por lo que se tomaron 2 muestras correspondientes al mes de junio y julio para así iniciar el análisis del proceso de coagulación- filtración.

4.4. FASE IV. DISEÑO DE PRUEBAS DE TRATABILIDAD

Seguido, se procedió a hacer la elección de los coagulantes, dosis, tiempo de mezcla y condiciones operativas relevantes para concentrar la mayor información posible sobre la mejor opción de la remoción de arsénico en el agua para consumo humano.

4.5. FASE V. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Posteriormente, con la ayuda del kit “QUANTOFIX Arsenic Sensitive” se realizaron las pruebas de tratabilidad, este kit maneja un rango entre 0.005 y 0.5 mg/L de As +3 y +5, por medio de los reactivos identificados como As – I, 125 g As – II (ácido amino sulfónico) y 250 g As – III (zinc en polvo), el primero es líquido y los restantes en polvo. El procedimiento se llevó a cabo por medio de un proceso de agitación posterior a la agregación del reactivo en la muestra, siguiendo la guía proporcionada por el kit. Dependiendo de este resultado pueden pasar de blanca a marrón amarillento, siendo este último color indicativo

de la mayor concentración de arsénico presente que sería 0.5 mg/L según el máximo mostrado por el kit, el procedimiento se muestra a continuación:

1. Se agregaron 100 mL del agua muestra al recipiente correspondiente:

Figura 3. Recipiente con 100 mL de muestra.



Fuente propia

2. Se agregaron 2 gotas del reactivo indicado como As-I y se agitó durante 2 segundos

Figura 4. Recipiente con As-I.



Fuente propia

3. Luego, se agregó una cucharada blanca del reactivo indicado como As-II y se agitó durante dos segundos.

Figura 5. Recipiente con As-II.



Fuente propia

4. Posteriormente, se agregó una cucharada roja del reactivo indicado como As-III y se agitó durante dos segundos.

Figura 6. Recipiente con As-III.



Fuente propia

5. Se tapó el recipiente con la cánula abierta y se insertó una tira reactiva por el orificio sin que tocara la muestra durante 15 minutos.

Figura 7. Recipiente con la tira reactiva.



Fuente propia.

4.5.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO IBM SPSS

Con los resultados obtenidos, se determinó bajo qué condiciones la remoción de arsénico es más efectiva, a su vez se comparó con la normativa la cual presenta el límite máximo permisible y se evidenció si este resultado cumple con las exigencias establecidas. De acuerdo con lo anterior se procedió a realizar los análisis de los resultados obtenidos por medio de la herramienta IBM SPSS que lleva a cabo comparaciones con un error del 5%, por último, se determinó la mejor alternativa de remoción de arsénico y el material filtrante con mejor comportamiento.

Con base a los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio con el fin de validar la mejor alternativa para la remoción de arsénico en el agua para consumo humano se hizo uso de la herramienta IBM SPSS de la siguiente manera se pueden distinguir las variables ingresadas:

- Coagulante 0: sin coagulante
- Coagulante 1: PAC
- Coagulante 2: sulfato de aluminio
- Coagulante 3: cloruro férrico
- M0: muestra inicial
- M1: sin filtración
- M2: zeolita
- M3: carbón activado
- Conc: concentración (acompañada del número al que corresponda, la concentración 0 se refiere sin ninguna concentración)

Luego de ingresar las variables y los valores correspondientes, se eligió el método de análisis post hoc por lo que se trabajó Tukey B^{a,b} que emplea la distribución de rango estudentizado que consiste en trabajar con la diferencias del máximo y del mínimo entre las medias de diferentes variables, ya sean independientes o no, para así realizar comparaciones por pares entre grupos, este análisis se realizó con un alfa de 0.05 (IBM , 2021).

4.6. FASE VI. PLAN DE MEJORA

Se planteó un plan de mejora, este se realizó con base al Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua de la OMS (OMS, 2009), en el cual inicialmente se expuso cuáles son las opciones de atenuación de riesgos para así determinar los procedimientos operativos requieren una mejora, verificando cuales son las variables que no se hayan tenido en cuenta, partiendo de tener conocimiento de lo anterior, se planteó el plan de mejora, en el cual se estipularon las medidas de mejora, el fundamento, es decir, que se hará y por qué, el responsable, la fecha de ejecución y el estado actual del proceso.

Por otro lado, para mantener el plan de mejora y asegurar que se cumpla, se planteó un plan de monitoreo operativo, donde se registra el proceso, qué se hará, cuándo y quién debe hacerlo, con el fin de que las medidas se lleven a cabalidad.

También contiene aspectos como lo son los costos totales de la implementación de este sistema de remoción, finalmente se redactaron las conclusiones sobre la investigación realizada y posibles recomendaciones para su posterior replicación.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo al objetivo principal de este trabajo, los resultados recolectados en las pruebas de tratabilidad con los diferentes coagulantes, se muestran a continuación.

5.1. FASE I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica referente al tema de remoción de arsénico en el agua para consumo humano, debido a que en Colombia la investigación no se encuentra desarrollada se tuvo en cuenta el contexto internacional en países como Irán, México, Chile, Turquía, entre otros, que presentan diferentes problemáticas entorno a las concentraciones de arsénico y donde se han propuesto diferentes tratamientos como electrocoagulación, coagulación-floculación, coagulación-filtración, entre otros, haciendo uso de distintos coagulantes o condiciones operarias, entre los coagulantes más empleados están las sales de aluminio y las sales férricas, además las condiciones que varían son la velocidad de mezcla rápida o lenta, el tiempo de sedimentación, la dosis de coagulante, si se realiza un ajuste de pH, etc, siendo estas variables las más significativas en el proceso de remoción de arsénico.

Por otro lado, a través de bibliografía, se identifica que la planta de tratamiento de Santa Rosa de Cabal funciona de manera convencional, es decir, que los procesos llevados a cabo son pretratamiento, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, además a la entrada de la planta hacen uso de un desarenador. La planta trabaja un caudal de 650 l/seg, el coagulante empleado por la planta es sulfato de aluminio, manejan el proceso de coagulación a través de la canaleta parshall (EMPOCABAL ESP, 2017)

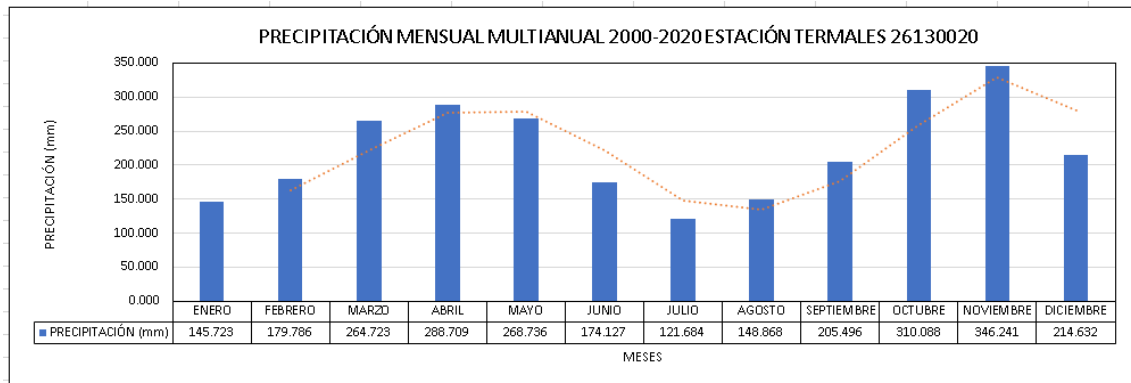
5.2. FASE II. PROTOCOLO DE MUESTREO

Con el fin de determinar la mejor época del año para la toma de la muestra, es decir, que no se presenten precipitaciones elevadas para que la concentración de arsénico en el cuerpo de agua no disminuya o se altere, se tomaron 5 estaciones del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) del municipio de Santa Rosa de Cabal con un registro de 20 años (2000-2020) de precipitación media mensual, con el fin de realizar un análisis multianual y así determinar qué periodo sería más favorable.

Las precipitaciones registradas varían entre 100 mm a 400 mm, a lo largo de un año presenta un comportamiento bimodal donde los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre se presentan como mayores precipitaciones a comparación de los periodos entre junio y agosto y diciembre a febrero que se caracterizan por ser más secos o menos lluviosos.

Para la estación Termales en el análisis multianual presentado a continuación, el valor mínimo es de 121.68 mm de precipitación en el mes de julio, mientras que el valor máximo corresponde a 346.24 mm del mes de noviembre.

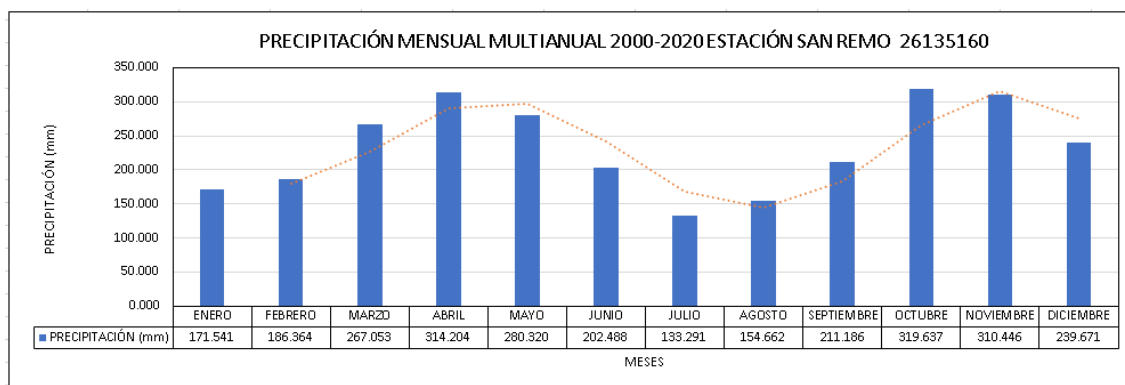
Figura 8. Precipitación mensual multianual 2000-2020 Estación Termales 26130020



Elaboración propia a partir de datos del IDEAM.

Por otro lado, la estación San Remo presenta en el mes de julio la precipitación más baja con un valor de 133.29 mm y en el mes de octubre se presenta el valor máximo de precipitación 319.64 mm entre los años analizados.

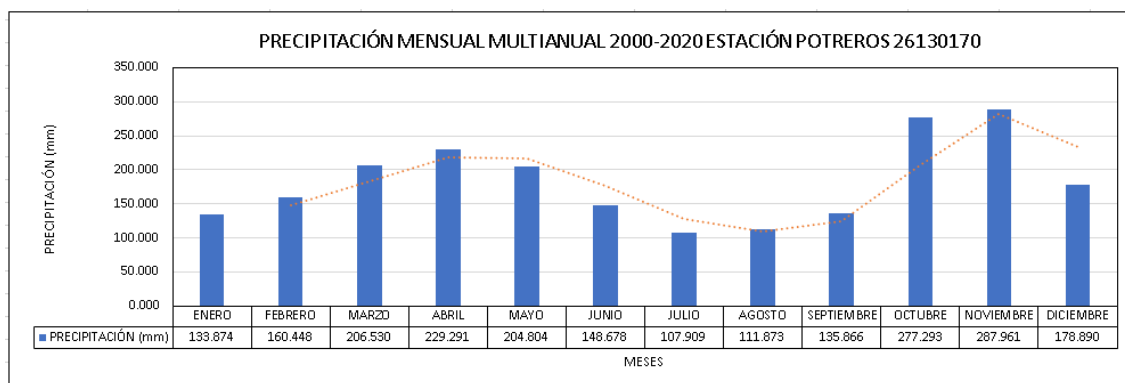
Figura 9. Precipitación mensual multianual 2000-2020 Estación San Remo 26135160



Elaboración propia a partir de datos del IDEAM.

De igual manera, la estación Potreros presenta su precipitación mínima en el mes de julio con un valor de 107.90 mm y su precipitación máxima es de 287.96 mm en el mes de noviembre.

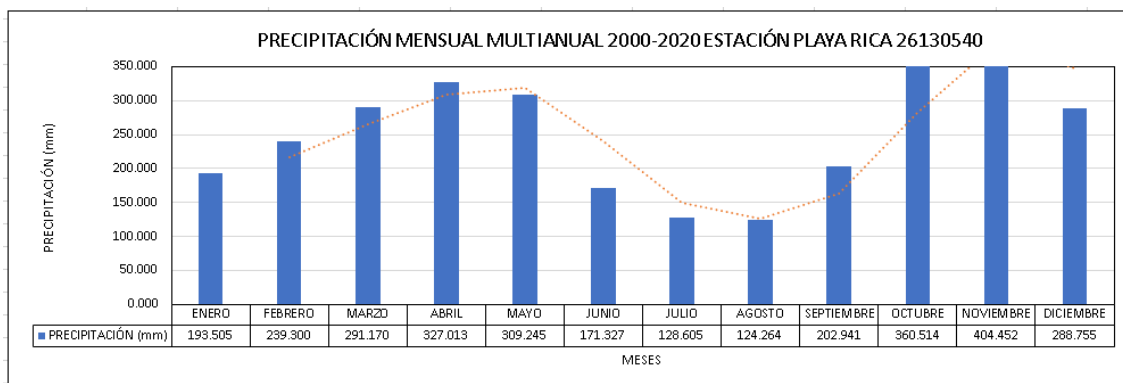
Figura 10. Precipitación mensual multianual 2000-2020 Estación Potreros 26130170



Elaboración propia a partir de datos del IDEAM.

A diferencia de las anteriores estaciones, la estación Playa Rica presenta el mes menos lluvioso en agosto con una precipitación de 124.26 mm y su mes más lluvioso en noviembre con un valor de 404.45 mm.

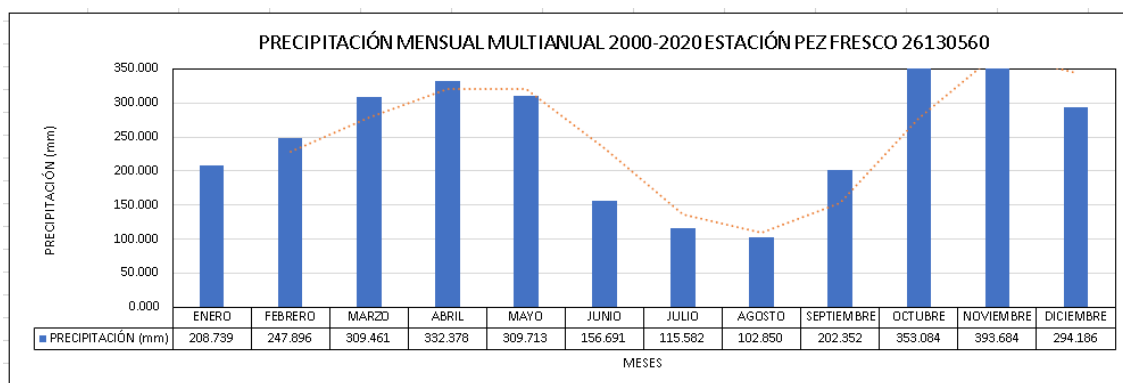
Figura 11. Precipitación mensual multianual 2000-2020 Estación Playa Rica 26130540



Elaboración propia a partir de datos del IDEAM.

Por último, la estación Pez Fresco mantiene al igual que la estación Playa Rica el mes con menor lluvia en agosto con una precipitación de 102.85 y el mes con mayor lluvia en noviembre siendo 393.68 el valor de esta.

Figura 12. Precipitación mensual multianual 2000-2020 Estación Pez Fresco 26130560

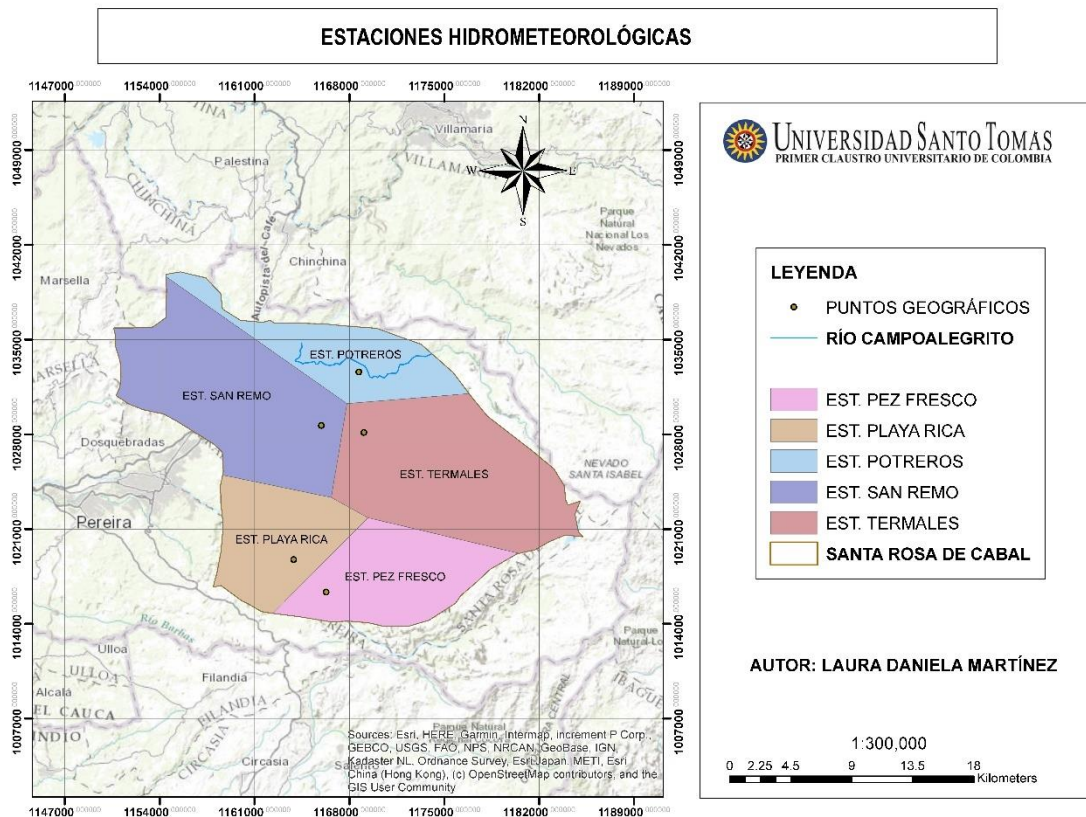


Elaboración propia a partir de datos del IDEAM.

La ubicación de las estaciones se muestra a continuación, todas estas se encuentran dentro del municipio de Santa Rosa de Cabal y las más cercanas a la bocatoma del río Campoalegrito son la estación Potreros, estación San Remo y estación Termales:

Figura 13. Ubicación estaciones hidrometeorológicas.

Figura 14. Polígonos de Thiessen estaciones hidrometeorológicas.



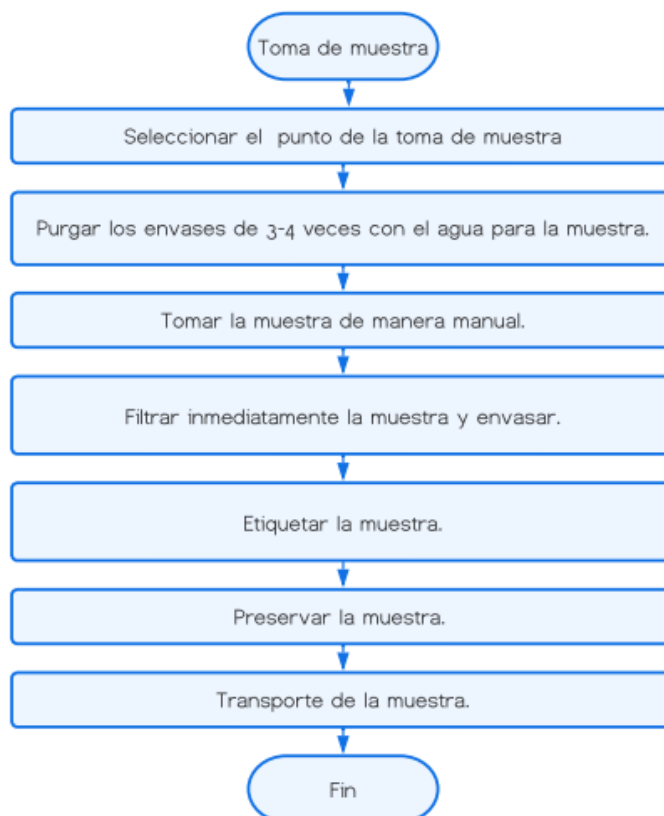
Fuente propia

De acuerdo a lo anterior, se realizaron 2 muestreos en los meses de junio y julio que presentaban menores lluvias, esto con el fin de que el arsénico no disminuyera sus concentraciones, el tipo de envase en el que se tomaron las muestras fue de plástico (polietileno) con una capacidad de 1 litro y además como se especificó anteriormente se realizó una filtración inmediata, los análisis de laboratorio que se llevaron a cabo son pH, temperatura y arsénico, esto debido a que autores como Bazrafshan, Mohammadi, Wang y Mondal afirman una que el valor de pH influye en la concentración de arsénico, de manera que, a valores de pH altos las eficiencias de remoción disminuyen lo mismo que en valores de pH bajos, por lo que se confirmó que el valor de las muestras estuviera alrededor de 7 unidades de pH, la temperatura se controló de manera que no se incrementara significativamente, con el fin de evitar posibles reacciones que intervinieran de manera negativa en el proceso(Wang et al., 2014).

En cuanto al diseño de toma de muestra se realizó de una manera sencilla teniendo en cuenta los parámetros de preservación y conservación, donde inicialmente se seleccionó el punto de la toma de la muestra, que fue en la

bocatoma del Río Campoalegrito, como se mencionó anteriormente según la guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM, se debe purgar el envase y además se llevará a cabo el muestreo de manera manual, teniendo en cuenta la filtración de esta, por otro lado, fue de suma importancia el etiquetado y la preservación para finalmente tener las condiciones más óptimas de transporte.

Figura 15. Diseño de toma de muestra.



Fuente propia

Para el tamaño y número de muestra, se tuvo en cuenta la disponibilidad de insumos presentes en las instalaciones de la universidad para realizar las pruebas de tratabilidad de arsénico, además de la logística para el transporte de la muestra desde Santa Rosa de Cabal hasta Bogotá. Dicho lo anterior, se llevaron a cabo dos muestreos en el mes de junio y julio, siendo los meses menos lluviosos, cada uno con diferentes cantidades de muestra en el muestreo de junio fueron tomados 6 litros de agua de la bocatoma de Campoalegrito y para el caso de julio se depositaron 8 litros de agua, para así contar con muestra significativa para llevar a cabo varias pruebas de tratabilidad.

5.3. FASE III. MUESTREO

La toma de la muestra se llevó a cabo en la bocatoma del Río Campoalegrito, a 1895 m.s.n.m, con una temperatura promedio de 16°C y un caudal de 550 L/seg, las muestras fueron tomadas en los meses de junio y julio que corresponden a los periodos de menor lluvia en la zona de estudio, con el fin de que la concentración de arsénico no se encontrara diluida.

Figura 16. Ubicación bocatoma del río Campoalegrito



Fuente propia

A continuación, se presenta evidencia fotográfica de la zona de muestreo junto a los envases usados.

Figura 17. Zona de muestreo.



Fuente propia

5.3.1. CADENA DE CUSTODIA

En cuanto la cadena de custodia de la muestra, para la recolección de cada una de las muestras se hizo uso de un recipiente de plástico (polietileno) de 1L de capacidad, rotulados donde se presentaron datos como la fecha y hora del muestreo, lugar, el número de muestra al que correspondía, el tipo de fuente, en este caso superficial, el responsable y por último la preservación.

Al momento de la toma de la muestra se llevó a cabo “la purga” del envase, que consiste en lavar en repetidas ocasiones el envase con el agua a analizar, inmediatamente se tomaba la muestra se procedía a filtrar, esto con el fin de cumplir con la guía de preservación y conservación de muestras.

El transporte de la muestra desde Santa Rosa de Cabal hasta Bogotá, fue llevado a cabo por una transportadora limitando al mínimo el tiempo de entrega en una nevera de poliestireno para que la preservación de la muestra no se viera afectada, una vez recibida se refrigeraba en las instalaciones de la universidad.

5.4. FASE IV. DISEÑO DE PRUEBAS DE TRATABILIDAD

Para la elección del coagulante se tuvo en cuenta la revisión bibliográfica realizada, donde autores como Bazrafshan y Mohammadi en el 2013 hacen uso de sales de aluminio, por otro lado, autores como Wang en el 2014, Cui en el 2015, Laky en el 2011 hacen uso de sales férricas, también los coagulantes más empleados en plantas de tratamiento de agua potable tienen estos compuestos inorgánicos de aluminio o hierro, además de los coagulantes inorgánicos prepolimerizados como el policloruro de aluminio o PAC (Cogollo, 2009), con base en esto y con el fin de determinar una mejor opción para la remoción de arsénico en el agua para consumo humano se emplean los siguientes coagulantes:

- PAC (1%)
- Sulfato de aluminio (1%)
- Cloruro férrico (1%)

Para todos los casos en el desarrollo de la prueba de jarras se manejan diferentes dosis con el fin de evaluar las mejores alternativas y el comportamiento de cada coagulante, las dosis son:

- 0.5 g/mL
- 1.0 g/mL
- 1.5 g/mL
- 2.0 g/mL
- 2.5 g/mL
- 3.0 g/mL

Además, se establecen diferentes tiempos de mezcla rápida y lenta y sedimentación.

Tabla 3. Tiempo de mezcla

Mezcla rápida	120 rpm	1 minuto
Mezcla lenta	50 rpm	5 minutos
	40 rpm	5 minutos
	30 rpm	5 minutos
Sedimentación	0 rpm	15 minutos

Fuente propia

Por último, se tuvo como material filtrante carbón activado y zeolita con el fin de pasar cada muestra con la misma dosis por cada uno de los materiales luego de realizar el proceso de coagulación.

Figura 18. Montaje de filtración



Fuente propia

5.5. FASE V. ANÁLISIS DE LABORATORIO

5.5.1. MUESTRA INICIAL

Inicialmente se tomaron los parámetros de pH, temperatura y turbiedad de la muestra, antes de cualquier proceso, donde se obtuvo lo siguiente:

Tabla 4. Parámetros iniciales.

Mes	pH	T°C	Turbiedad
Junio	7.69	11.5°C	0.8 UNT
Julio	7.61	11.7°C	0.5 UNT

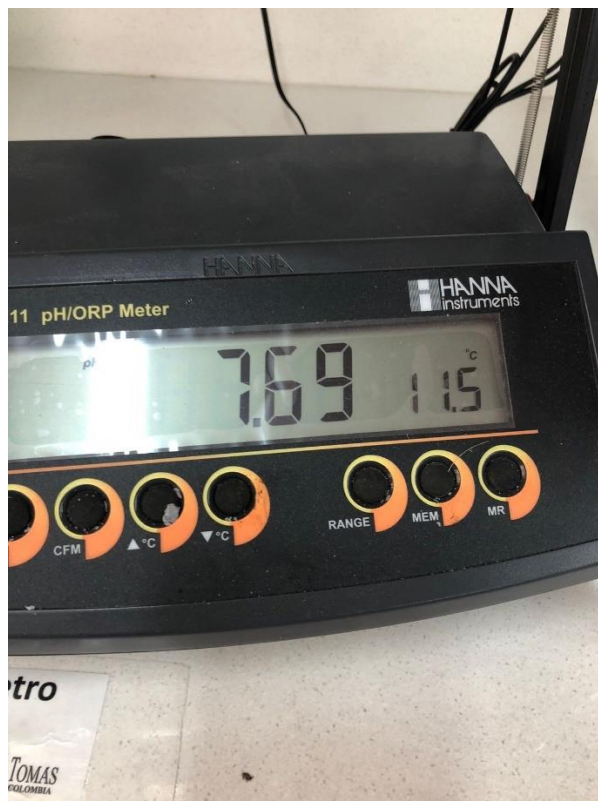
Fuente propia

Figura 19. Resultado turbiedad junio.



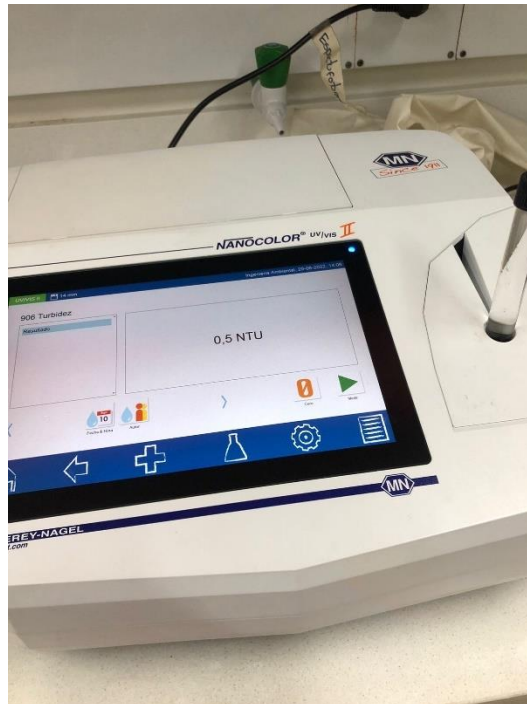
Fuente propia

Figura 20. Resultado pH y T° junio.



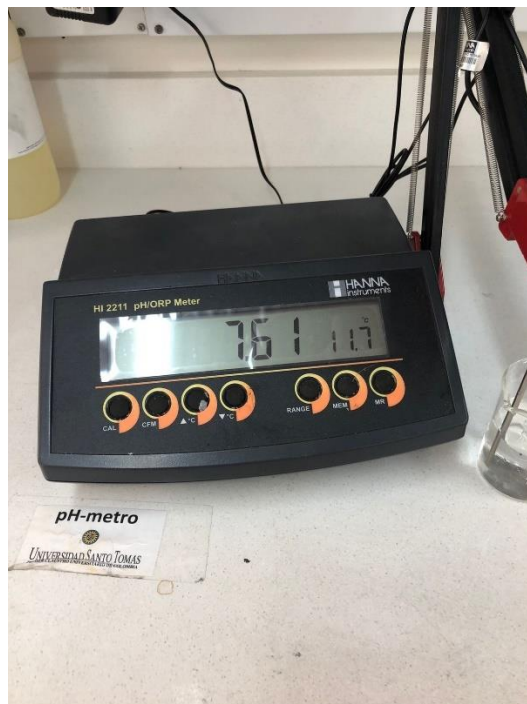
Fuente propia

Figura 21. Resultado turbiedad julio.



Fuente propia

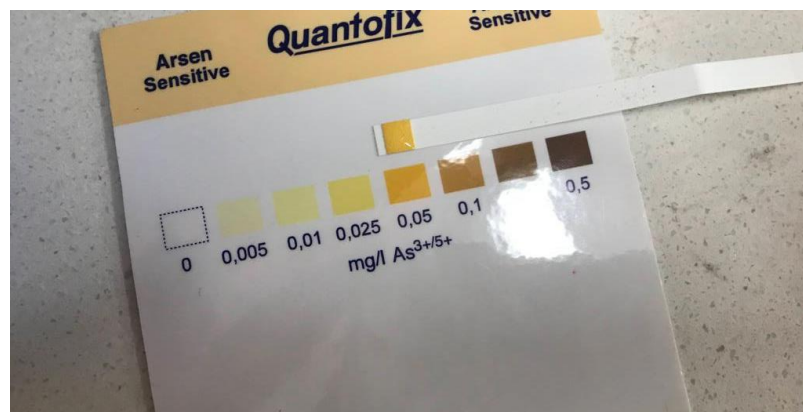
Figura 22. Resultado pH y T° julio.



Fuente propia

Respecto a la Resolución 2115 del 2007 que contiene los límites permisibles para el agua de consumo humano, se establece un rango entre 6 – 9 unidades de pH y un valor máximo de 2 UNT para la turbiedad (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007), se puede deducir con esto que el agua de la fuente puede cumplir algunos parámetros importantes como fuente de abastecimiento. Por otro lado, una vez medidos los parámetros se realizó la medición de arsénico de la muestra, el cual corresponde a 0.05 mg/L As+3 +5, este valor es debido a las condiciones naturales de la zona, como lo son los termales como principal fuente de arsénico, además de que al tomar las muestras en la época con menor cantidad de lluvias influye en la concentración de arsénico presente en el agua ya que existe también una relación entre la temperatura y las concentraciones del metal (Pedraza, 2020). Comparándolo con la normativa este supera el máximo límite permisible dado por la normativa que es 0.01 mg/L As+3 +5 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007)

Figura 23. Resultado de la concentración de arsénico muestra inicial.



Fuente propia

A continuación se observan los resultados de las pruebas de tratabilidad para cada uno de los coagulantes elegidos, por cada una de las dosis las cuales varían de 0.5 g/mL hasta 3.0 g/mL, se realizaron 3 muestras de arsénico por cada muestra, la primera que se tuvo fue la muestra sin filtración pero expuesta al proceso de coagulación, luego, se tuvo la muestra que pasa por carbón activado como material filtrante y por último la que pasó por zeolita, con un total de pruebas de arsénico de 18 por cada uno de los coagulantes, a cada una de ellas también se le asignó una medición de pH y temperatura como medida de

control, posteriormente se realizó el cálculo de la remoción de arsénico en la muestra tomando como el valor inicial el obtenido anteriormente de 0.05 mg/L As+3+5 y finalmente una comparación de con el valor estipulado por la normativa que corresponde a 0.01 mg/L As+3 +5.

Tabla 5. Diagrama de número de muestras.

COAGULANTE	DOSIS	MEDIO FILTRANTE
C1, C2, C3	M1: 0.5 g/mL	Prueba sin filtración
		Prueba filtrando con zeolita
		Prueba filtrando con carbón activado
	M2: 1.0 g/mL	Prueba sin filtración
		Prueba filtrando con zeolita
		Prueba filtrando con carbón activado
	M3: 1.5 g/mL	Prueba sin filtración
		Prueba filtrando con zeolita
		Prueba filtrando con carbón activado
	M4: 2.0 g/mL	Prueba sin filtración
		Prueba filtrando con zeolita
		Prueba filtrando con carbón activado
	M5: 2.5 g/mL	Prueba sin filtración
		Prueba filtrando con zeolita
		Prueba filtrando con carbón activado
	M6: 3.0 g/mL	Prueba sin filtración
		Prueba filtrando con zeolita
		Prueba filtrando con carbón activado

Fuente propia

5.5.2. PRUEBA DE JARRAS

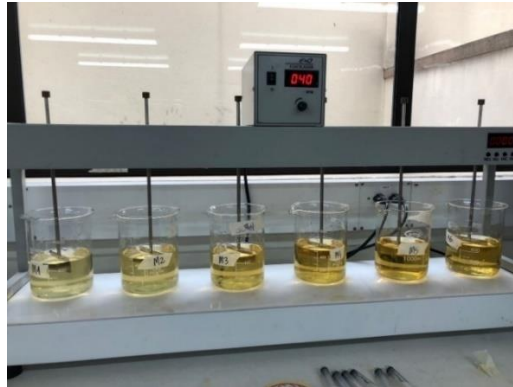
Se agregaron las dosis ya propuestas a seis muestras de 500mL en cada vaso de precipitado con el fin de realizar las pruebas de jarras.

Se puede notar en la figura 21, que hace referencia al proceso de coagulación con PAC, como el color amarillo se vuelve más dominante relacionado a la dosis, entre más coagulante posea mayor es su tonalidad, por otro lado, la formación de los flóculos se desarrolló en mayor cantidad para la muestra 1 y la muestra 2, las cuales contienen las concentraciones de 0.5 g/mL y 1.0 g/mL, esto se ve relacionado a que los compuestos formados por sales de aluminio y con un pH entre 6.5 – 8.0 se comportan mejor a las acciones del coagulante, también al no tener una temperatura relativamente baja permite que la energía cinética del agua no se vea afectada fuertemente (Sierra & Guatame, 2016)

De igual manera, en la figura 22, que es la prueba de jarras con el sulfato de aluminio, se logra observar que el coagulante no adiciona color representativo a la muestra, se presenta poca formación de flóculos, posiblemente ocasionado por la cantidad de coagulante, por último en la figura 23, que contienen las dosis

de cloruro férrico tampoco desarrolla una tonalidad fuerte, se presentó formación de flóculos en todas las muestras, lo que puede deberse a factores como el rango del pH, debido a que las sales de hierro trabajan bien en un rango de 5.5 – 8.5 unidades de pH (Sierra & Guatame, 2016)

Figura 24. Prueba de jarras PAC.



Fuente propia

Figura 25. Prueba de jarras sulfato de aluminio.



Fuente propia

Figura 26. Prueba de jarras cloruro férrico.



Fuente propia

5.5.3. COAGULANTE 1 (PAC)

A continuación, se presentan los resultados de la concentración de arsénico en las muestras de agua posterior al proceso de coagulación con PAC y filtración por carbón activado o zeolita o también sin filtración.

▪ ARSÉNICO

Mediante el uso del kit QUANTOFIX Arsenic Sensitive se detectó la concentración de arsénico final para 6 muestras con diferente dosis de coagulante, los valores obtenidos varían entre 0 mg/L As₃₊₅₊ a 0.025 mg/L As₃₊₅₊, algunas mediciones se presentan a continuación:

Figura 27. Resultado concentración de arsénico muestra 1 PAC.



Fuente propia

Figura 28. Resultado concentración de arsénico muestra 3 PAC.



Fuente propia

Los resultados obtenidos para las 18 pruebas fueron los siguientes para el coagulante PAC:

Tabla 6. Resultados de la concentración de arsénico PAC.

COAGULANTE: PAC		
MUESTRA	FILTRACIÓN	ARSÉNICO
1	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.000mg/L As3+/5+
2	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.005mg/L As3+/5+
3	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.010mg/L As3+/5+
4	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+
5	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+
6	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+

Fuente propia

Se puede observar la variación en las concentraciones de arsénico, dando como resultado una notable disminución en todas las muestras, especialmente en las muestras con menor cantidad de dosis de coagulante y haciendo uso de zeolita como material filtrante.

▪ **PORCENTAJE DE REMOCIÓN**

Con el fin de determinar cuál dosis favorecía más la remoción de arsénico en el agua para consumo humano de la fuente Campoalegrito se realizó el cálculo del porcentaje de remoción de As, con la siguiente ecuación:

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la remoción de arsénico:

Tabla 7. Resultados del porcentaje de remoción de arsénico PAC.

COAGULANTE: PAC			
MUESTRA	FILTRACIÓN	ARSÉNICO	REMOCIÓN
1	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.000mg/L As3+/5+	100%
2	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.005mg/L As3+/5+	90%
3	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.010mg/L As3+/5+	80%
4	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%
5	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%
6	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%

Fuente propia

Respecto a lo anterior, se puede analizar como a mayor dosis de coagulante la remoción de arsénico presenta menores valores de remoción que con dosis menores, esto se relaciona con una posible sobredosis en las muestras lo que no permite una adecuada formación de flóculos y por ende la absorción del arsénico durante el proceso es deficiente pero no nula (Bazrafshan et al., 2013a), la zeolita se destaca debido a que las remociones más altas de arsénico inclusive hasta el 100% se presentan para este material filtrante, este tiene características como una mayor capacidad de retención de sólidos y además alta microfiltración que permite la adherencia de los sólidos durante la filtración (Purikor, 2018).

▪ **COMPARACIÓN CON LA NORMATIVIDAD**

Como se mencionó anteriormente, la Resolución 2115 del 2007 establece un límite máximo permisible para el contenido de arsénico en el agua para consumo humano que es de 0.01mg/L, se realizó la comparación de los resultados obtenidos para el coagulante PAC, donde el “NO ACEPTABLE” supera este valor máximo y el “ACEPTABLE” está por debajo o en el límite (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

Tabla 8. Comparación de la normatividad respecto a los resultados de arsénico PAC.

COAGULANTE: PAC			
MUESTRA	FILTRACIÓN	ARSÉNICO	CONDICIONAL
1	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.000mg/L As3+/5+	ACEPTABLE
2	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.005mg/L As3+/5+	ACEPTABLE
3	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.010mg/L As3+/5+	ACEPTABLE
4	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
5	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE

6	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE

Fuente propia

Las dosis de 0.5 – 1.0 – 1.5 g/mL PAC y el uso de zeolita como material filtrante presentan los resultados dentro del límite permitido de arsénico.

5.5.4. COAGULANTE 2 (SULFATO DE ALUMINIO)

Los resultados de la remoción de arsénico en el proceso llevado a cabo con el coagulante sulfato de aluminio y una filtración con carbón activado, zeolita o sin filtración se presentan a continuación.

▪ ARSÉNICO

Se determinó la concentración de arsénico a partir del kit QUANTOFIX Arsenic Sensitive, mediante el desarrollo de 18 pruebas de tratabilidad, se tienen los siguientes resultados:

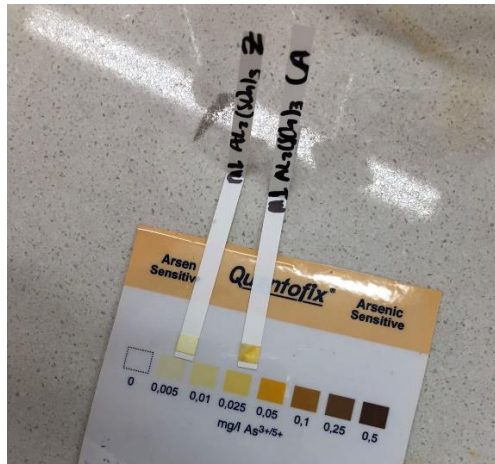
Tabla 9. Resultados de arsénico sulfato de aluminio.

COAGULANTE: SULFATO DE ALUMINIO		
MUESTRA	FILTRACIÓN	ARSÉNICO
1	SIN FILTRACIÓN	0.050mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.005mg/L As3+/5+
2	SIN FILTRACIÓN	0.050mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+
3	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+
4	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+
5	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+
6	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+

Fuente propia

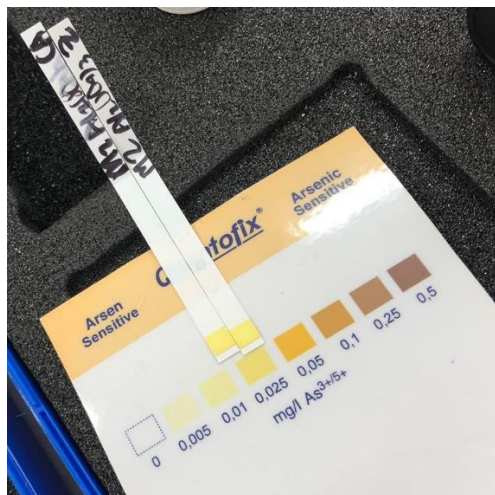
Se muestran a continuación algunos resultados de la medición de la concentración de arsénico con el kit QUANTOFIX Arsenic Sensitive:

Figura 29. Resultado concentración de arsénico muestra 1 sulfato de aluminio.



Fuente propia

Figura 30. Resultado concentración de arsénico muestra 2 sulfato de aluminio.



Fuente propia

Para este caso se presenta una disminución en la concentración de arsénico en 16 de las 18 muestras llevadas a cabo, las dos primeras dosis sin filtración no presentan alguna alteración en el contenido de arsénico manteniendo el valor inicial de 0.05 mg/L As₃+5+, la única disminución representativa se presenta en la muestra 1 mediante el uso de zeolita como material filtrante.

▪ **PORCENTAJE DE REMOCIÓN**

En la tabla que se muestra a continuación, están los resultados de remoción de arsénico obtenidos a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Tabla 10. Resultados del porcentaje de remoción de arsénico sulfato de aluminio.

COAGULANTE: SULFATO DE ALUMINIO			
MUESTRA	FILTRACIÓN	ARSÉNICO	REMOCIÓN
1	SIN FILTRACIÓN	0.050mg/L As3+/5+	0%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.005mg/L As3+/5+	90%
2	SIN FILTRACIÓN	0.050mg/L As3+/5+	0%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%
3	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%
4	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%
5	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%
6	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%

Fuente propia

El uso de sulfato de aluminio como coagulante no presentan remociones altas y tan eficientes al punto de cumplir con la remoción esperada que sería menor o igual a 0.01 mg/L, respecto a los resultados de PAC, que proviene de una sal de aluminio resulta ser más eficiente, esto debido a que las formas prehidrolizadas de los coagulantes como lo es el PAC, presentan una mayor efectividad que los tradicionales (Duan & Gregory, 2003).

▪ **COMPARACIÓN CON LA NORMATIVIDAD**

A continuación, se presenta la relación entre el valor máximo permisible para arsénico de la Resolución 2115 de 2017 con los datos obtenidos para las pruebas con sulfato de aluminio.

Tabla 11. Comparación de la normatividad respecto a los resultados de arsénico sulfato de aluminio.

COAGULANTE: SULFATO DE ALUMINIO			
MUESTRA	FILTRACIÓN	ARSÉNICO	CONDICIONAL
1	SIN FILTRACIÓN	0.050mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.005mg/L As3+/5+	ACEPTABLE
2	SIN FILTRACIÓN	0.050mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
3	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
4	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
5	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
6	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE

Fuente propia

Mediante la comparación de la Resolución 2115 de 2007, se observa la poca eficiencia de remoción para el caso del sulfato de aluminio, aún más a concentraciones mayores, siendo este uno de los coagulantes con mayor uso para las plantas de tratamiento (Franco & Carro, 2014), como es el caso de EMPOCABAL ESP (EMPOCABAL ESP, 2017).

5.5.5. COAGULANTE 3 (CLORURO FÉRRICO)

Se presentan los resultados obtenidos al llevar a cabo el proceso de coagulación – filtración, en este caso, con el coagulante cloruro férrico a las mismas dosis de 0.5 – 3.0 g/mL FeCl₃.

▪ ARSÉNICO

La concentración de arsénico fue determinada a partir del kit QUANTOFIX Arsenic Sensitive para 18 muestras con diferente material filtrante o sin filtración y con dosis de coagulante ya determinadas, la siguiente tabla evidencia los resultados obtenidos:

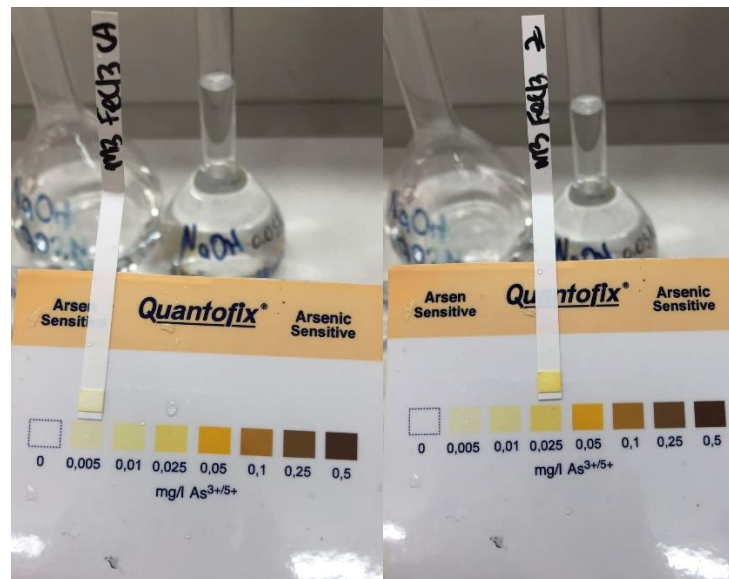
Tabla 12. Resultados de arsénico cloruro férrico.

COAGULANTE: CLORURO FÉRRICO		
MUESTRA	FILTRACIÓN	ARSÉNICO
1	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As ₃₊₅₊
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As ₃₊₅₊
	ZEOLITA	0.025mg/L As ₃₊₅₊
2	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As ₃₊₅₊
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As ₃₊₅₊
	ZEOLITA	0.005mg/L As ₃₊₅₊
3	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As ₃₊₅₊
	CARBÓN ACTIVADO	0.005mg/L As ₃₊₅₊
	ZEOLITA	0.025mg/L As ₃₊₅₊
4	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As ₃₊₅₊
	CARBÓN ACTIVADO	0.010mg/L As ₃₊₅₊
	ZEOLITA	0.025mg/L As ₃₊₅₊
5	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As ₃₊₅₊
	CARBÓN ACTIVADO	0.010mg/L As ₃₊₅₊
	ZEOLITA	0.025mg/L As ₃₊₅₊
6	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As ₃₊₅₊
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As ₃₊₅₊
	ZEOLITA	0.005mg/L As ₃₊₅₊

Fuente propia

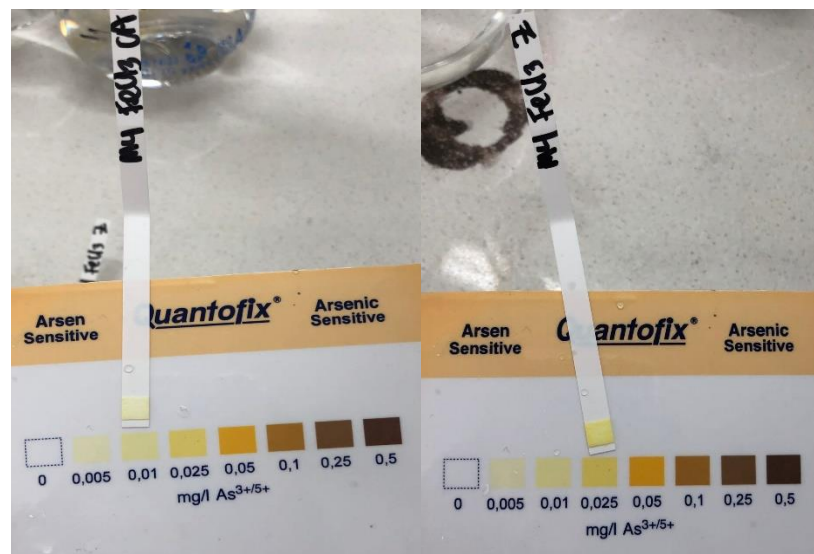
Se observan las mediciones algunas obtenidas mediante el uso del kit y cloruro férrico como coagulante:

Figura 31. Resultado concentración de arsénico muestra 3 cloruro férrico.



Fuente propia

Figura 32. Resultado concentración de arsénico muestra 4 cloruro férrico.



Fuente propia

▪ PORCENTAJE DE REMOCIÓN

El porcentaje de remoción de arsénico se calculó de la siguiente manera, siendo la concentración inicial el valor de la muestra sin proceso de coagulación con un valor de 0.05 mg/L As_{3+5+} y la concentración final los valores obtenidos:

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Tabla 13. Resultados del porcentaje de remoción de arsénico cloruro férrico.

COAGULANTE: CLORURO FÉRRICO			
MUESTRA	FILTRACIÓN	ARSÉNICO	REMOCIÓN
1	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%
2	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.005mg/L As3+/5+	90%
3	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.005mg/L As3+/5+	90%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%
4	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.010mg/L As3+/5+	80%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%
5	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.010mg/L As3+/5+	80%
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	50%
6	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	50%
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	50%
	ZEOLITA	0.005mg/L As3+/5+	90%

Fuente propia

El cloruro férrico presenta los mejores resultados en cuanto remoción de arsénico, ya que todas las muestras tienen al menos un 50% de remoción y 5 de ellas un valor superior al 80%, lo que se evidencia que el contenido férrico del coagulante resulta ser más eficiente que las sales de aluminio, para este caso la remoción de arsénico aumenta con las dosis mayores del coagulante, permitiendo una mayor formación de flóculos y así una mejor adherencia al carbón activado y a la zeolita (Donmez & Akbal, 2011).

▪ COMPARACIÓN CON LA NORMATIVIDAD

Por último, se presenta la comparación con el valor máximo según la Resolución 2115 del 2007 y los valores obtenidos usando cloruro férrico como coagulante.

Tabla 14. Comparación de la normatividad respecto a los resultados de arsénico cloruro férrico.

COAGULANTE: CLORURO FÉRRICO			
MUESTRA	FILTRACIÓN	ARSÉNICO	CONDICIONAL
1	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
2	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.005mg/L As3+/5+	ACEPTABLE
3	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.005mg/L As3+/5+	ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
4	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.010mg/L As3+/5+	ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
5	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.010mg/L As3+/5+	ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
6	SIN FILTRACIÓN	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	CARBÓN ACTIVADO	0.025mg/L As3+/5+	NO ACEPTABLE
	ZEOLITA	0.005mg/L As3+/5+	ACEPTABLE

Fuente propia

Con lo anterior, se puede observar la tendencia positiva del cloruro férrico en la remoción de arsénico, favoreciendo así los valores de las concentraciones de arsénico obtenidos respecto al límite máximo permisible para el caso de concentraciones superiores a 1.0 g/mL con los dos materiales filtrantes propuestos.

5.5.6. REPETICIÓN MUESTRAS ACEPTABLES

Con el fin de corroborar la información obtenida anteriormente, se realizó una repetición en el proceso de coagulación – filtración y remoción de arsénico para las muestras con un resultado inferior al límite máximo permisible estipulado.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos siendo iguales o similares a los anteriormente dados, además se presenta el valor correspondiente al pH que permite un mayor análisis de los datos.

Para el caso de las repeticiones no se llevaron a cabo las mediciones para cada material filtrante y sin filtración, sino solo por el material que resultó estar en el rango permitido, teniendo un total de 9 muestras con su respectiva dosis.

Tabla 15. Resultados de arsénico PAC de muestras aceptables.

COAGULANTE: PAC						
MUESTRA	DOSIFICACIÓN	FILTRACIÓN	pH	ARSÉNICO	REMOCIÓN	CONDICIONAL
1	0.50g/mL PAC	ZEOLITA	5.41	0.000mg/L As ₃₊₅₊	100%	ACEPTABLE
2	1.00g/mL PAC	ZEOLITA	5.71	0.000mg/L As ₃₊₅₊	100%	ACEPTABLE
3	1.50g/mL PAC	ZEOLITA	5.53	0.010mg/L As ₃₊₅₊	80%	ACEPTABLE
COAGULANTE: SULFATO DE ALUMINIO						
4	0.50g/mL Al ₂ (SO ₄) ₃	ZEOLITA	6.09	0.005mg/L As ₃₊₅₊	90%	ACEPTABLE
COAGULANTE: CLORURO FÉRRICO						
5	1.00g/mL FeCl ₃	ZEOLITA	6.21	0.005mg/L As ₃₊₅₊	90%	ACEPTABLE
6	1.50g/mL FeCl ₃	CARBÓN ACTIVADO	6.24	0.010mg/L As ₃₊₅₊	80%	ACEPTABLE
7	2.00g/mL FeCl ₃	CARBÓN ACTIVADO	6.35	0.010mg/L As ₃₊₅₊	80%	ACEPTABLE
8	2.50g/mL FeCl ₃	CARBÓN ACTIVADO	6.45	0.010mg/L As ₃₊₅₊	80%	ACEPTABLE
9	3.00g/mL FeCl ₃	ZEOLITA	6.69	0.005mg/L As ₃₊₅₊	90%	ACEPTABLE

Fuente propia

Es posible afirmar la eficiencia de remoción para las dosis tomadas para cada uno de los coagulantes, acompañada del material filtrante más óptimo, con lo anterior también se resalta que el uso de zeolita como material filtrante favorece más el proceso, esto relacionado al porcentaje de remoción de la zeolita para las muestras que en su mayoría son del 90% y en dos de los casos el 100%, mientras que las muestras en las que el material filtrante es el carbón activado se mantienen en un rango del 80%. Por otro lado, se relacionan los resultados de pH debido a que tanto la dosis del coagulante usada como el valor del pH permiten la correcta precipitación de los sólidos, lo que favorece el proceso de coagulación-filtración (Davis & Edwards, 2014).

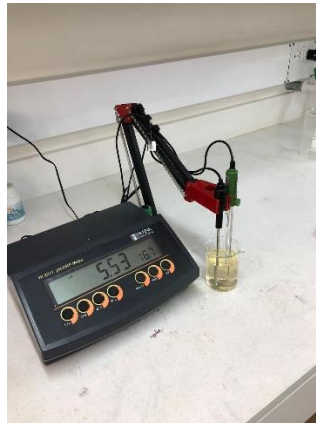
Además la solubilidad de los coagulantes se ve relacionada con el pH, donde las sales férricas trabajan mejor en un rango de 5.5 a 8.5 unidades de pH y las sales de aluminio en un rango de 6.5 a 8.0 unidades de pH (Sierra & Guatame, 2016), por lo que la disolución de las sales férricas es posible que sea más eficiente al tener un rango más amplio para la absorción de los elementos presentes en la muestra, como el arsénico, a partir de los resultados de pH y lo que exige la Resolución 2115 de 2007 en cuanto al rango de pH el cual debe estar entre 6 – 9 unidades de pH, favorece más las sales férricas, debido a que

se mantienen el rango y no se ven altamente afectados lo que no requiere un ajuste de pH posterior al proceso.

La temperatura es otro factor que puede influenciar el proceso de remoción de arsénico, debido a que temperaturas muy bajas pueden afectar la formación de los flóculos debido a la baja actividad cinética, para el caso de las muestras se tiene un rango de temperatura de 16.7°C a 17.03°C siendo una temperatura favorable para el proceso (Davis & Edwards, 2014).

Por último, se presentan los resultados de algunas mediciones de pH, temperatura, arsénico y la prueba de jarras.

Figura 33. Medición de pH muestra 3.



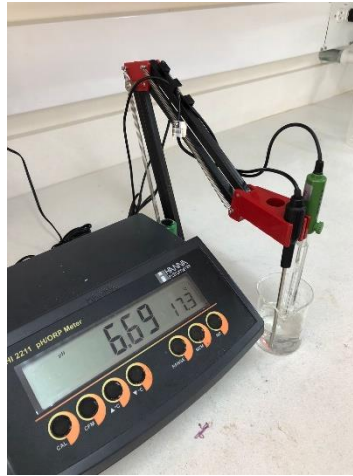
Fuente propia

Figura 34. Medición de pH muestra 4.



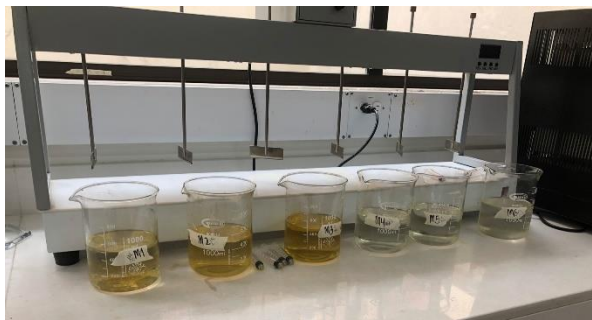
Fuente propia.

Figura 35. Medición de pH muestra 9.



Fuente propia

Figura 36. Prueba de jarras muestras aceptables.



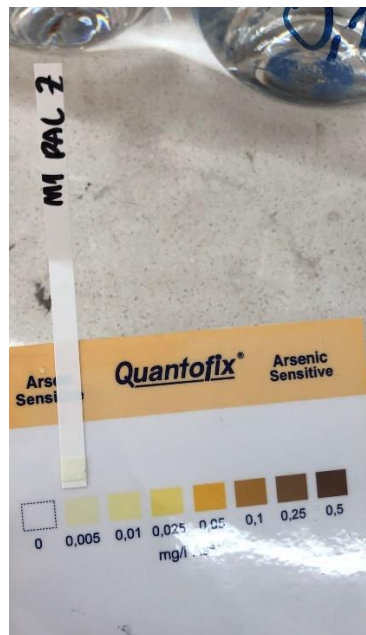
Fuente propia

Figura 37. Prueba de jarras muestras aceptables.



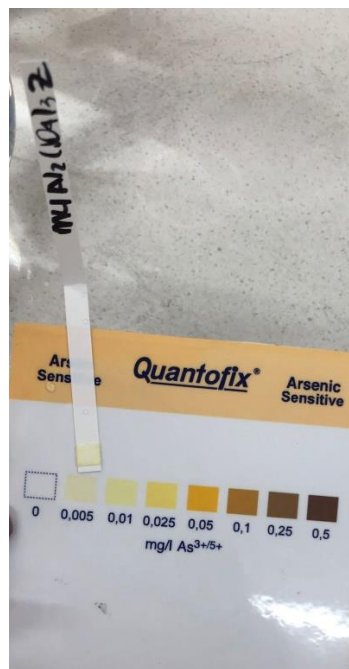
Fuente propia

Figura 38. Resultado concentración de arsénico muestra 1 PAC.



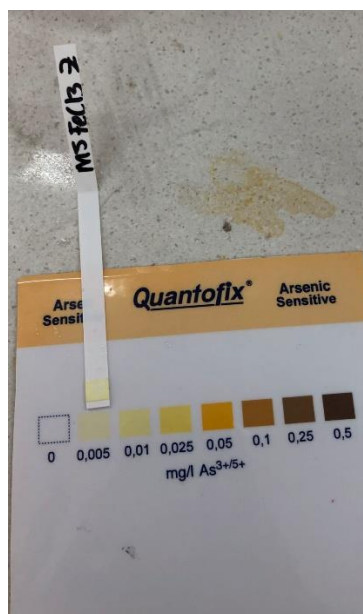
Fuente propia

Figura 39. Resultado concentración de arsénico muestra 4 sulfato de aluminio



Fuente propia

Figura 40. Resultado concentración de arsénico muestra 5 cloruro férrico y zeolita.



Fuente propia

Figura 41. Resultado concentración de arsénico muestra 7 cloruro férrico y carbón activado.



Fuente propia

5.5.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO IBM SPSS

Con base a los resultados obtenidos, se procedió a realizar el análisis por medio de la herramienta IBM SPSS, ingresando inicialmente los datos de los coagulantes se tiene lo siguiente:

Tabla 16. Resultados para coagulante IBM SPSS

COAGULANTE	N	Subset		
		1	2	3
3.0	18	.020000		
1.0	18	.021667	.021667	
2.0	18		.026667	
.0	18			.050000

Fuente IBM SPSS

Con lo anterior, se tienen 18 datos por cada variable, el valor del coagulante 0 corresponde al valor de la muestra inicial que es 0.05 mg/L As³⁺/ 5+, los resultados obtenidos se clasifican en 3 grupos diferentes mostrando diferencias significativas en el comportamiento del arsénico sin ningún tipo de coagulante, es decir, el grupo 3, mientras que el grupo 2 presenta una relación entre el coagulante 1 y el coagulante 2, PAC y sulfato de aluminio respectivamente, por encontrarse en el mismo grupo pero a pesar de esto se presenta una diferencia entre los valores de estos coagulantes, además el coagulante 1 se localiza en el grupo 1 donde también está el coagulante 3 que presenta la mayor diferencia de significancia entre todos los demás resultados, es decir, que puede no tener un comportamiento completamente diferente respecto al coagulante 1 pero se encuentra mejor posicionado.

Por otro lado, se presentan los resultados obtenidos para material filtrante:

Tabla 17. Resultados para material filtrante IBM SPSS

MATERIAL FILTRANTE	N	Subset		
		1	2	3
m2	18	.018333		
m3	18	.022222		
m1	18		.027778	
m0	18			.050000

Fuente IBM SPSS

Como en el caso anterior, los diferentes materiales filtrantes presentan 3 grupos, donde el grupo 3 hace referencia al que no tiene ningún tratamiento y por ende ningún material filtrante, el grupo 2 tiene el valor del que sí tiene su respectivo proceso de coagulantes pero sin ningún tipo de filtración, siendo diferentes en su totalidad entre sí y con el grupo 1, este grupo contiene a la zeolita y al carbón activado, y a pesar de que se encuentran en el mismo grupo porque su diferencia no es completamente significativa, se presentan rangos diferentes donde sobresale el valor obtenido para la zeolita comparándolo con los demás valores obtenidos, es decir, que tiene mejor comportamiento esta.

Finalmente, se concluye que el coagulante cloruro férrico presenta un mejor comportamiento entre todos, también con base a los resultados de las pruebas de tratabilidad su remoción es mayor, además se presentan más valores que cumplen la normatividad a comparación del coagulante PAC que presenta 3 y el sulfato de aluminio sólo 1. Por otro lado, la zeolita desarrolla un mejor trabajo a comparación del carbón activado.

5.6. FASE VI. PLAN DE MEJORA

Continuando con los objetivos propuestos, se plantea a continuación un plan de mejora relacionado a la implementación de este sistema de remoción, esto debido a los riesgos presentes para la seguridad del agua y de salud humana debido a la concentración de arsénico presentes en EMPOCABAL ESP, donde se desarrollaron diferentes medidas de control que o no han entrado en aplicación o no han sido lo suficientemente eficaces para la problemática, por lo que basados en los análisis anteriores, se diseña un plan de mejora, a cada mejora propuesta se le plantea un fundamento y como específicamente se tratará, además de un responsable, fecha de ejecución y estado (OMS, 2009).

Este plan de mejora realiza inicialmente el análisis de aspecto como las opciones de atenuación de riesgos, haciendo un recuento de que riesgo se considera oportuno tratar y sus consecuencias además de una propuesta inicial acerca de la mejora de procedimientos operativos, con lo que se prioriza en el plan de mejora y se establecieron diferentes fases, una vez identificado esto se tiene la investigación y desarrollo se presentan algunas recomendaciones de acuerdo con lo estipulado.

5.6.1. OPCIONES DE ATENUACIÓN DE RIESGOS

Como se ha mencionado anteriormente, la presencia de arsénico en el agua para consumo humano, en su forma inorgánica, presenta un riesgo grave para la salud humana al reflejarse desde lesiones superficiales en la piel hasta el punto de ser cancerígenas para los seres humanos, la concentración de arsénico en el agua puede deberse a intervenciones antropogénicas o causas naturales, (Wang, y otros, 2014), esto último es lo que sucede en Santa Rosa de Cabal, más específicamente en el Río Campoalegrito. Por ello EMPOCABAL ESP, ha implementado diferentes medidas y se proponen planes estratégicos, pero tanto como las medidas y los planes han sido poco eficientes y algunos a largo plazo requieren grandes inversiones de dinero, por lo que la propuesta de atenuación de riesgos se enfoca en el reemplazo de coagulantes en el proceso interno de la planta y además la implementación de un material filtrante que sea de fácil lavado y accesible.

5.6.2. MEJORA DE PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS

El plan de mejora va enfocado en proponer una manera en que el arsénico sea reducido al interior de la planta de tratamiento, sin la necesidad de requerir obras e instalaciones que dificulten su aplicación, por ello los procedimientos operativos que se propone mejorar son los siguientes:

- Coagulación: al realizar una modificación en el tipo de coagulante que se usará ya sea PAC (Policloruro de Aluminio) o cloruro férrico, además de las dosis a aplicar, buscando una dosis óptima que se ajuste a las variables relacionadas como el pH y la temperatura.
- Filtración: modificación del material filtrante, preferiblemente zeolita.

5.6.3. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Se recomienda realizar una investigación de otras variables que no se hayan tenido en cuenta y que puedan llegar a afectar algún otro proceso o resultado al interior de la planta, además que en el desarrollo se valide, por medio de constantes pruebas, el mejor resultado del coagulante a usar y la dosis requerida para el caudal y la escala de la planta de tratamiento.

5.6.4. MEDIDAS DE UN PLAN DE MEJORA

Para la implementación del plan de mejora con base al Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua de la OMS se proponen las siguientes medidas:

Tabla 18. Medidas de un plan de mejora.

MEDIDA	FUNDAMENTO	PLAN DE MEJORA ESPECIFICO DETERMINADO	RESPONDABLE	FECHA LÍMITE DE EJECUCIÓN	ESTADO
CAMBIO DE COAGULANTE	Sustituir el sulfato de aluminio actualmente implementado debido a que se ha determinado que el uso de coagulantes como el PAC y el cloruro férrico favorecen el proceso de remoción de arsénico por medio de las pruebas de tratabilidad.	Validar el uso de los coagulantes en la planta de tratamiento mediante monitoreos continuos.	Ingeniero/a Operarios	En función de lo establecido por los comités de la empresa EMPOCABAL ESP.	No comenzado
CAMBIO DE MATERIAL FILTRANTE	Reemplazar el material filtrante usado actualmente, por la zeolita ya que gracias a las pruebas realizadas demuestran un mejor comportamiento como filtro para la remoción de arsénico.	Instalar el material filtrante, comprobando que cumplan de manera satisfactoria con los estándares esperados.	Ingeniero/a Operarios	En función de lo establecido por los comités de la empresa EMPOCABAL ESP.	No comenzado
RETROLAVADO DE LOS FILTROS	Mantener un lavado constante de los filtros, con el fin de evitar la aglomeración de material que afecten la remoción de arsénico.	Implementar medidas de control y gestión para que el lavado de los filtros se realice con alta frecuencia.	Operarios	En función de lo establecido por los comités de la empresa EMPOCABAL ESP.	No comenzado
MONITOREO DE ARSÉNICO	Realizar pruebas constantes dentro de la planta de tratamiento al agua clarificada y posteriormente al agua filtrada, con el fin de tener una constante retroalimentación y seguridad de que el proceso es efectivo.	Desarrollar medidas de control que permitan un monitoreo constante de las concentraciones de arsénico.	Ingeniero/a Operarios	En función de lo establecido por los comités de la empresa EMPOCABAL ESP.	No comenzado

Fuente propia con base al Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua de la OMS

5.6.5. PLAN DE MONITOREO OPERATIVO

Para llevar a cabo la verificación de la calidad del agua y de los procesos de la planta de tratamiento, se propone el siguiente plan de monitoreo operativo basado en el Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua de la OMS.

Tabla 19. Plan de monitoreo operativo

PROCESO	MONITOREO OPERATIVO		
	QUÉ	CUÁNDO	QUIÉN
DOSIFICACIÓN	Concentración de coagulante	Cada día	Operarios de la planta de tratamiento.
	Dosis óptima del coagulante	Cada día	
	Registros de pruebas de jarras	Cada semana	
	Medición de pH	Cada día	
	Medición de arsénico	Cada día	
COAGULACIÓN	Registros de dosificación	Cada día	
	Medición de pH	Cada día	
	Medición de T°	Cada día	
FILTRACIÓN	Medición de arsénico	Cada día	
	Inspección del material filtrante	Cada semana	
	Retrolavado de filtros	Cada día	

Fuente propia con base al Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua de la OMS

5.6.6. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Por último, se lleva a cabo la estimación de costos, teniendo en cuenta que se sugiere el uso de cualquiera de los dos coagulantes se estiman por aparte haciendo uso de la zeolita como material filtrante, que tiene una vida útil de 3 a 5 años como material filtrante, se tuvieron en cuenta algunas condiciones operarias como el caudal que trata la planta que es de 650L/seg, el área total de los filtros que corresponde a 250m² y la altura de los filtros que es 0.8 m, por otro lado, para el cálculo de la cantidad se tuvo en cuenta el valor de las dosis aceptables haciendo uso de zeolita, la dosis de cada coagulante que corresponde a 20mg/L, que se encuentra dentro del rango empleado por la PTAP y del material filtrante fueron consultados a través de proveedores como químicos campota, la leñería, y leños la colina, a continuación, se presentan los costos:

Tabla 20. Costos de implementación PAC y zeolita.

ITEM	ACTIVIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
POLICLORURO DE ALUMINIO	COAGULACIÓN	33.696 kg/mes	\$6,764 / Kg	\$ 227,919,744 / mes
ZEOLITA	FILTRACIÓN	354.560 kg	\$7,920 / Kg	\$ 2,808,115,200
			COSTO TOTAL	\$ 3,036,034,944

Fuente propia

Tabla 21. Costos de implementación cloruro férrico y zeolita.

ITEM	ACTIVIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
CLORURO FÉRRICO	COAGULACIÓN	33.696 kg/mes	\$6,500 / Kg	\$ 219,024,000 / mes
ZEOLITA	FILTRACIÓN	354.560 kg	\$7,920 / Kg	\$ 2,808,115,200
			COSTO TOTAL	\$ 3,027,139,200

Fuente propia

Los costos anteriores, fueron calculados de la siguiente manera:

Ecuación 1. Costos coagulantes

$$\text{Costos coagulantes} = \text{Caudal} \frac{m^3}{\text{mes}} * \text{Dosis coagulante} \frac{Kg}{m^3}$$

Fuente propia

Ecuación 2. Costo material filtrante

Costo material filtrante

$$= \text{Área total } m^2 * \text{Altura del filtro } m * \text{Densidad material} \frac{Kg}{m^3}$$

Fuente propia

En conclusión, resulta más rentable en circunstancias económicas el uso de cloruro férrico manteniendo como material filtrante la zeolita, además de los resultados expuestos con anterioridad acerca de su eficiencia en la remoción de arsénico.

6. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO

Al realizar la evaluación del proceso de coagulación - filtración para la remoción efectiva de arsénico en el tratamiento de agua para el consumo humano en EMPOCABAL ESP, se determina que la importancia a nivel social recae en la mitigación y reducción de las concentraciones del arsénico en el agua, puesto que trae consigo efectos negativos como neurotoxicidad, diabetes, enfermedades cardiovasculares, lesiones cutáneas, cáncer y hasta la muerte debido al consumo o exposición prolongada o repetitiva en diferentes concentraciones del metal (OMS, 2018). Por lo cual es de vital importancia para la salud pública y el bienestar humano aportar a la mitigación y reducción de las concentraciones de arsénico en el agua para consumo humano teniendo en cuenta los costos asequibles, esto se logró a partir de diferentes puntos de vista:

- Remover el arsénico del agua para consumo humano mediante procesos viables económicamente, favorece que sean llevados a cabo de manera constante y que no se manifiesten como un valor adicional para los usuarios que se abastecen de la planta de tratamiento.
- Aporte de información para posteriores investigaciones interesada en estudiar la concentración de arsénico en el agua potable y tratamientos de mejora para este proceso de coagulación-filtración, usando como base el caso de estudio de EMPOCABAL ESP.
- Mediante el plan de mejora propone se espera enfocar la atención en progresar en que la calidad de agua para consumo humano en la zona de estudio sea buena, favoreciendo a la población aledaña a este proyecto, en caso tal de ser ejecutado por EMPOCABAL ESP.

7. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la identificación de las variables que inciden en la remoción de arsénico durante el proceso de coagulación – filtración, las cuales son el pH, temperatura y dosis de coagulante, las dos primeras son de vital importancia debido a que las bajas temperaturas o pH muy ácidos afectarían la cinética del proceso, ocasionando que no se desarrollen en los tiempos de mezcla los flóculos o que la sedimentación sea un proceso lento, es importante encontrar la dosis óptima de coagulante con el fin de que no se sobredosisifique o por el contrario sea insuficiente la cantidad por lo que la deficiencia baje y no se logre cumplir con los valores máximos permisibles.

Mediante las pruebas de tratabilidad con muestra de la fuente de abastecimiento Río Campoalegrito, fue posible determinar la eficiencia de remoción la cual oscila entre el 80%-100%, es decir, un valor entre 0.0 mg/L As³⁺⁵⁺ - 0.01 mg/L As³⁺⁵⁺, esto depende tanto del coagulante como de la dosis implementada y además del material filtrante; de los coagulantes estudiados, PAC, sulfato de aluminio y cloruro férrico se destaca el uso de PAC y cloruro férrico, ambos alcanzaron un alto porcentaje de remoción en las dosis de 0.5 a 1.5 g/mL de PAC y de 1.0 a 3.0 g/mL de FeCl₃, pero al relacionar variables como el pH donde el PAC tuvo un valor máximo de 5.71 unidades de pH y el cloruro férrico un valor de 6.69 unidades de pH, es más favorable el uso de cloruro férrico ya que se encuentra en el rango estipulado en la Resolución 2115 del 2007 y no sería necesario un posterior ajuste de pH. Por otro lado, el uso del material filtrante tanto el carbón activado como la zeolita lograron tener remociones altas, pero de acuerdo con las pruebas realizadas la zeolita tiene un mejor comportamiento en cuanto la remoción de arsénico.

Se estructuró un plan de mejora teniendo en cuenta que se propone el uso de zeolita como material filtrante y alguno de los dos coagulante como PAC o cloruro Férrico, con base a esto se estipularon diferentes medidas para llevar a cabo no solo el cambio de coagulante y material filtrante, sino también el retrolavado de los filtros y un monitoreo más intenso del arsénico a lo largo del proceso dentro de la planta, además a esto se llevó a cabo el análisis de costos para la implementación del proceso, teniendo en cuenta que para las cantidades se estimó un área total de los filtros y la altura, además se tuvo en cuenta el caudal que se trata al interior de la planta y la dosis empleada, dando como mejor opción el uso de cloruro férrico con un costo de \$ 3,027,139,200.

Se dio cumplimiento al objetivo principal, ya que, por medio de diferentes pruebas de tratabilidad, a diferentes dosis, diferentes coagulantes y distintos materiales filtrantes se logró evaluar el proceso de coagulación – filtración, teniendo resultados óptimos respecto a la remoción de arsénico en la fuente de abastecimiento principal de EMPOCABAL ESP, haciendo uso del kit QUANTOFIX Arsenic Sensitive.

8. RECOMENDACIONES

Es necesario realizar un análisis de precipitaciones inicialmente con el fin de determinar el mes en el que resulta más conveniente tomar una muestra de agua en el cuerpo de agua a estudiar, para así mantener concentraciones relevantes iniciales para su posterior estudio de remoción.

Es importante respetar la preservación de la muestra, además de la filtración al momento de la toma de la muestra, debido a que la presencia de sólidos en el agua puede generar un cambio en la muestra que las condiciones del ensayo o las características de la fuente de agua se modifiquen y den resultados erróneos.

Resulta conveniente que durante el proceso se lleve a cabo un correcto lavado de los filtros empleados, esto con el fin de que el material filtrante no pierda adherencia o no se sature afectando así el proceso de filtración ocasionando una alteración en los resultados ya sea de arsénico o de variables como turbiedad y color.

Se recomienda hacer uso de elementos de protección dentro del laboratorio para la manipulación tanto de la muestra, como de los reactivos pertenecientes al kit QUANTOFIX Arsenic Sensitive y el uso de coagulantes.

Debe tenerse en cuenta la validación en la planta de tratamiento de Santa Rosa de Cabal de los coagulantes empleados para estudiar su dosis óptima y cuál de los dos favorece más a los procesos llevados a cabo dentro de la planta y sus objetivos, además en caso de aplicación se deben tener monitoreos constantes tanto a las concentraciones de arsénico como al estado de los filtros con el fin de que funcione de la mejor manera el proceso coagulación-filtración.

9. REFERENCIAS

Acuatecnica S.A.S. (Abril de 2016). Plantas de tratamiento de agua potable. Obtenido de <https://acuatecnica.com/una-planta-tratamiento-agua-potable/>

Alonso, D. L., Latorre, S., Castillo, E., & Brandão, P. F. B. (2014). Environmental occurrence of arsenic in Colombia: A review. *Environmental Pollution*, 186, 272–281. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2013.12.009>

Asamblea Nacional Constituyente. (1991). Constitución Política de Colombia. Obtenido de <https://www.constitucioncolombia.com/indice.php>

ATSDR. (Agosto de 2007). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades - Arsénico. Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.pdf

ATSDR. (Octubre de 2011). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades - La toxicidad del arsénico. Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/efectos_fisiologicos.html

Bazrafshan, E., Faridi, H., Mostafapour, F. K., & Mahvi, A. H. (2013). Removal of arsenic from aqueous environments using moringa peregrina seed extract as a natural coagulant. *Asian Journal of Chemistry*, 25(7), 3557–3561. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2013.13647>

Bazrafshan, E., Mohammadi, L., & Mostafapour, F. K. (2013). Survey efficiency of coagulation process with polyaluminum chloride using aloe vera as coagulant aid for arsenic removal from aqueous solutions. *Wulfenia*, 20(6), 323–341.

Camacho, R., & Peña, M. (2018). Diseño de una planta de tratamiento de agua potable para la población de la Playita, sitio Nuevo Magdalena. Barranquilla.

Caminati, A., & Catherine, R. (2013). Análisis y diseño de sistemas de tratamiento de agua para consumo humano y su distribución en la Universidad de Piura. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1738/ING_526.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Centro de investigación en materiales avanzados. (2013). CIMAV. Obtenido de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1056/1/Libro%20013-Arsenico%20en%20el%20Agua%20con%20ISBN.pdf>

Chulluncuy, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. Ingeniería Industrial (29), 153-170. <https://www.redalyc.org/pdf/3374/337428495008.pdf>

Cogollo, J. (11 de agosto de 2009). Revistas UNAL. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133#:~:text=Los%20coagulantes%20m%C3%A1s%20comunes%20que,y%20cloruro%20f%C3%A9rrico%20%5B6%5D>

Concha, J. d., & Guillén, J. P. (2014). Mejoramiento del sistema de abastecimiento de agua potable. Perú.

Davis, C., & Edwards, M. (2014). Coagulation With Hydrolyzing Metal Salts: Mechanisms and Water Quality Impacts. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 303-347.

Diaz, W. (2017). Evaluación y optimización de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Tena en el departamento de Cundinamarca. Obtenido de https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14490/1/Trabajo_21.pdf

DISIN S.A. (s.f.). Prueba de jarras. Obtenido de <https://www.disin.com/que-es-para-que-sirve-y-cuando-se-debe-realizar-una-prueba-de-jarras/>

Donmez, M., & Akbal, F. (2011). The Removal of As(V) from Drinking Waters by. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering Vol 5, 340-342.

Dinka, M.O. (2018) Safe Drinking Water: Concepts, Benefits, Principles and Standards. In: Glavan, M., Ed., Water Challenges of an Urbanizing World, IntechOpen, London, 163-181. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71352>

Duan, J., & Gregory, J. (2003). Coagulation by hydrolysing metal salts. Advances in Colloid and Interface Science, 475-502.

EMPOCABAL ESP. (2017). Plan de acción para la mitigación del riesgo de la calidad de agua para consumo humano, por la presencia de arsénico en la fuente Campoalegrito. Obtenido de <https://www.empocabal.com.co/wp-content/uploads/2017/06/PlanDeAcci%c3%b3nMitigaci%c3%b3nArs%c3%a9nicoco.pdf>

Eslami, H., Esmaeili, A., Razaieian, M., Salari, M., Hosseini, A. N., Mobini, M., & Barani, A. (2022). Potentially toxic metal concentration, spatial distribution, and health risk assessment in drinking groundwater resources of southeast Iran. *Geoscience Frontiers*, 13(1), 101276. <https://doi.org/10.1016/J.GSF.2021.101276>

Francisca, F. M., Carro Pérez, M. E. (2014). Removal of arsenic in water by coagulation-flocculation processes | Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 30(2), 177–190.

Franco, F., & Carro, M. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 177-190.

Hanna Instruments. (s.f.). pHmetro. Obtenido de <https://www.hannacolombia.com/aqua/productos/medidor-de-ph-de-sobremesa>

Hernández, J., & Corredor, C. (2017). Diseño y construcción de una planta modelo de tratamiento para la potabilización de agua, se dispondrá en el laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/85002699.pdf>

IBM. (10 de Junio de 2021). IBM Documentation ANOVA de un factor: Contrastes post hoc. Obtenido de <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/saas?topic=anova-one-way-post-hoc-tests>

IDEAM. (2002). Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. https://corponor.gov.co/corponor/sigescor2010/TRAMITESYSERVICIOS/Guia_monitoreo_IDEAM.pdf

IDEAM. (s.f.). DHIME. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

INS. (2020). Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano. Obtenido de <https://www.ins.gov.co/BibliotecaDigital/informe-nacional-de-calidad-del-agua-para-consumo-humano-colombia-2020.pdf>

Kern s&d. (2020). Kernsd. https://kernsd.com/wp-content/uploads/2020/03/KERN_PAC-vr0_espan%CC%83ol.pdf

Kumar, I., & Quaff, A. R. (2019). Comparative study on the effectiveness of natural coagulant aids and commercial coagulant: removal of arsenic from water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(10), 5989–5994. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1980-8>

Laky, D., & Licskó, I. (2011). Arsenic removal by ferric-chloride coagulation - Effect of phosphate, bicarbonate and silicate. *Water Science and Technology*, 64(5), 1046–1055. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.419>

MACHEREY-NAGEL. (s.f.). Spectrophotometer NANOCOLOR UV/VIS II, 190–1100 nm. Obtenido de <https://www.mn-net.com/spectrophotometer-nanocolor-uv/vis-ii-190-1100-nm-919600.1>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (22 de junio de 2007). Ministerio de Salud. https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resoluci%C3%B3n_2115_de_2007.pdf

Ministerio de Protección Social. (2007). Observatorio Ambiental de Bogotá. Obtenido de https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3774

Mondal, N. S., Roy, P. K., Mazumdar, A., & Majumder, A. (2021). Comparative Study of Arsenic Removal Using Different Coagulants. In *Lecture Notes in Civil Engineering: Vol. 131 LNCE*. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6412-7_21

OMS. (2018). Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

OMS. (2009). Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/75142/9789243562636_spa.pdf;jsessionid=

Oregon Health Authority. (n.d.). Drinking Water Program Fact Sheet: Recommendations for Arsenic Removal from Private Drinking Water Wells in Oregon. Retrieved October 15, 2021, from <https://www.oregon.gov/oha/ph/HealthyEnvironments/DrinkingWater/SourceWater/Documents/gw/arsenicremoval.pdf>

Pedraza, P. (2020). Repositorio Universidad de las Fuerzas Armadas. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/22541/1/T-ESPE-043863.pdf>

Pramanik, B. K., Pramanik, S. K., & Suja, F. (2016). Removal of arsenic and iron removal from drinking water using coagulation and biological treatment. *Journal of Water & Health*, 14(1), 90–96. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=113072860&lang=es&site=ehost-live>

Purikor. (2018). Ficha técnica zeolita. <https://cdn-stor1.fibrasynormasdecolombia.com/wp-content/uploads/2018/05/ft-ficha-tecnica-zeolita.pdf>

Química.es. (2022). Cloruro de hierro (III). https://www.quimica.es/enciclopedia/Cloruro_de_hierro_%28III%29.html

SIDESA. (2020). Silicatos y Derivados S.A de C.V. [https://aniq.org.mx/pqta/pdf/Respaldo/Sulfato%20de%20Al.Sol.%20Libre%20de%20Fe\(toda%20LIT\).pdf](https://aniq.org.mx/pqta/pdf/Respaldo/Sulfato%20de%20Al.Sol.%20Libre%20de%20Fe(toda%20LIT).pdf)

Sierra, I., & Guatame, V. (2016). Repositorio Universidad Distrital. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/3471/SierraMolinalvannaDaniela%3BGuatameFontechaViviana2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Spena Group. (Diciembre de 2016). Planta de Tratamiento de Agua Potable. Obtenido de <https://spenagroup.com/planta-tratamiento-agua-potable/#:~:text=Una%20Planta%20de%20Tratamiento%20de,proceso%20de%20tratamiento%20y%20rendimiento.>

Standard Methods. (2018). 1060 Collection and Preservation of Samples. <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.009>

Universidad de Talca. (s.f.). Manual básico SPSS. Obtenido de https://www.fibao.es/media/uploads/manual_basico_spss_universidad_de_talca.pdf

Wang, Y., Duan, J., Liu, S., Li, W., van Leeuwen, J., & Mulcahy, D. (2014). Removal of As(III) and As(V) by ferric salts coagulation - Implications of particle size and zeta potential of precipitates. *Separation and Purification Technology*, 135, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.08.004>

Water Boards California. (s.f.). Folleto informativo pH 3.1.4.0. Obtenido de https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf

WHO. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Obtenido de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?ua=1>

World Health Organization. (2008). Guidelines for Drinking-water Quality THIRD EDITION INCORPORATING THE FIRST AND SECOND ADDENDA Volume 1 Recommendations Geneva 2008 WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.

Zarza, L. (s.f.). iAgua. Obtenido de <https://www.iagua.es/respuestas/como-se-potabiliza-agua>

ANEXOS

ANEXO 1

(FOTOGRAFÍAS DE LOS RESULTADOS DE As)

