

**Demostrar la Influencia de la Aplicación de Carbón Activado en Polvo
(CAP) Sobre la Calidad del Agua Potable para la Remoción De GSM Y
MIB en dos Condiciones de Operación (Con y Sin Ayudante de
Floculación) de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia,
Santander**

Julieth Dayanna Gáfaró Gelves (279648)

Gissela Navarro Nigrinis (283198)

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2019

**Demostrar la Influencia de la Aplicación de Carbón Activado en Polvo
(CAP) Sobre la Calidad del Agua Potable para la Remoción De GSM Y
MIB en dos Condiciones de Operación (Con y Sin Ayudante de
Floculación) de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia,
Santander**

Julieth Dayanna Gáfaro Gelves (279648)

Gissela Navarro Nigrinis (283198)

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERA AMBIENTAL

Director del Proyecto

Álvaro Andrés Cajigas Cerón

Magister en Ingeniería

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Llegar al final de esta meta se lo debo a aquellas personas que confiaron y apoyaron mis decisiones más difíciles. Le agradezco a Dios que me permitió encontrar una solución a cada piedra en el camino, en especial a mis Padres, mis hermanos, a mi jefe y mis compañeros de trabajo que estuvieron al tanto de este proceso.

Gissela Navarro Nigrinis

Agradecimientos

Gracias a Dios por la vida de mis padres, mi familia y mis amigos, también porque cada día junto a su gracia pude culminar con cada etapa de este trabajo de grado.

Gracias a mi familia por ser el motor y fuente de mis sueños, gracias a cada uno de ellos por su apoyo, en especial a mi madre por la dedicación y paciencia con la que cada día se preocupaba por mi avance y desarrollo de este trabajo; a mi tía Mery por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida; gracias a mi padre y a su esfuerzo realizado para la realización de mis estudios profesionales

Gracias a Fer por sus palabras de aliento en los momentos indicados, por su apoyo incondicional en la realización de este proyecto, por siempre creer en mis capacidades y en la realización de este trabajo de grado, por ayudarme a entender que los tiempos de Dios son perfectos y que no hay obstáculo que no podamos superar si tenemos a la persona correcta.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo, gracias a todas las personas que me apoyaron y creyeron en la culminación de nuestro proyecto.

Julieth Dayanna Gáfaró Gelves

Tabla de Contenidos

Introducción	3
Capítulo 1 Objetivos	6
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
Capítulo 2 Marco Teórico	7
Agua Potable	7
Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia	7
Normativa Colombiana	8
Decreto 1575 resolución 2125/2007	8
Características Fisicoquímicas del Agua.	9
Turbidez	9
Remoción de la turbiedad	10
Color	11
Sabor y olor	12
pH	13
Conductividad	14
Cianobacterias como productores de Geosmina y MIB	14
Geosmina y MIB	15
Métodos de remoción de Geosmina y MIB	16
Remoción por métodos físicos	17
Remoción y reducción de la entrada de nutrientes	17
Radiación ultrasónica	18
Carbón Activado en Polvo (CAP)	18
Aplicaciones del carbón activado	19
Funciones de la aplicación de carbón activado en el agua	20
Adsorción con carbón activado	21
Etapas del tren de tratamiento	22
Presedimentación	22
Coagulación	22
Factores que influyen en la coagulación	23
Floculación	24
Coloides	24

Propiedades de los Coloides	25
Partículas en suspensión	25
Polímeros	26
Mecanismos de acción del polímero con la coagulación y floculación	27
Formación del polímero con la superficie coloidal	28
Prueba de Jarras	29
Capítulo 3 Metodología	30
Ubicación Experimental y Consideraciones Iniciales	30
Tipo de muestra	30
Descripción de la unidad experimental	30
Factores y niveles de la unidad experimental	32
Factores del diseño experimental	32
Niveles del diseño experimental	33
Aleatorización de factores y niveles	34
Condiciones Estadísticas Analizadas	35
Análisis de Datos	36
Capítulo 4 Resultados y Análisis	39
Sin Adición de Polímero	39
Turbiedad	39
Turbiedad vs Punto de aplicación	40
Turbiedad vs Dosis de CAP	41
Color	42
Color vs Punto de aplicación vs Dosis de CAP	43
Con Adición de Polímero	45
Turbiedad vs Punto de aplicación	45
Turbiedad vs Dosis de CAP	46
Color	47
Color vs Punto de aplicación vs Dosis de CAP	47
Comparación de Resultados CP y SP	49
Determinación de GMS y MIB	50
Con Polímero	51
Sin polímero	51
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones	54
Recomendaciones	56

Anexo 1	62
Anexo 2	66

Lista de tablas

Tabla 1. Características Físicas del Tratamiento de Agua Potable	9
Tabla 2. Condiciones de operación en PTAP.	31
Tabla 3. Concentraciones Establecidas De CAP.	33
Tabla 4. Resultados de las mejores condiciones de calidad	49
Tabla 5. Análisis estadístico de varianza	66
Tabla 6. Comparación de las medias de CP y SP divididos por PA	66
Tabla 7. Comparación de las medias de CP y SP divididos por dosis	67

Lista de figuras

Figura 1. Resultados de la Característica Física Turbiedad sin Adición de Polímero.	40
Figura 2. Resultados de medición de color sin adición de polímero.	43
Figura 3. Resultados de la Característica Física Turbiedad con Adición de Polímero.	45
Figura 4. Resultados de Color vs dosis de CAP con Aplicación de Polímero.	47
Figura 5. Resultados de dosis vs conductividad sin Aplicación de Polímero.	51
Figura 6. Resultados de dosis vs conductividad con Aplicación de Polímero.	51
Figura 7. Resultados de dosis vs pH sin Aplicación de Polímero.	62
Figura 8. Resultados de dosis vs pH con Aplicación de Polímero.	63
Figura 9. Resultados de dosis vs pH sin Aplicación de Polímero.	64
Figura 10. Resultados de dosis vs pH con Aplicación de Polímero	65

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Proceso de Tratamiento de la Planta de Tratamiento de Bosconia.	8
Ilustración 2 Estructura Molecular Geosmina y 2-Metilisoborneol Respectivamente.	16
Ilustración 3 Estructura Interna del Carbón Activado.	20
Ilustración 4. Agitación Mecánica de la Solución Polímero.	27
Ilustración 5. Situaciones de la unidad experimental.	31
Ilustración 6. Sistema del Equipo Jarras.	34
Ilustración 7. Contenido del Proceso de Aleatorización.	35
Ilustración 8. Formación de floc sin presencia de polímero.	44
Ilustración 9. Formación de floc con presencia de polímero.	49

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Demostrar la Influencia de la Aplicación de Carbón Activado en Polvo (CAP) Sobre la Calidad del Agua Potable para la Remoción De GSM Y MIB en dos Condiciones de Operación (Con y Sin Ayudante de Floculación) de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia, Santander

AUTOR(ES): Dayanna Gáfaró Gelves
Gissela Navarro Nigrinis

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Alvaro Cajigas Cerón

RESUMEN

Este estudio se fundamenta en demostrar la influencia de la aplicación de carbón activado en polvo -CAP, sobre la calidad del agua potable para la remoción del sabor terro-mohoso causado por las floraciones de algas verde-azules y sus metabolitos -GSM y MIB. Situación presentada en el agua distribuida a parte del Área Metropolitana de Bucaramanga por la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia (PTAP). La simulación del proceso de operación de la PTAP Bosconia se lleva a cabo con la prueba de jarras como unidad experimental implementando tratamientos químicos y físicos a escala de laboratorio. Los procesos simulados son: sedimentación, floculación y coagulación; aplicando los respectivos tiempos de retención hidráulica y revoluciones por minuto programadas en el equipo; determinadas según el caudal de la planta de tratamiento. Cada unidad experimental cuenta con la aplicación de dosis de coagulante (Sulfato de Aluminio), adición del polímero (según situación) y concentración de CAP. Fueron aplicadas ocho diferentes concentraciones de CAP (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 mg/L) en cada uno de los puntos del tren de tratamiento, con el fin de determinar las mejores condiciones de calidad del agua. Según el comportamiento de las variables de respuesta se descartan el pH y conductividad como evaluadores de calidad. Los mejores resultados para la turbiedad y color se encontraron en el punto presedimentación sin adición de polímero, así como también se obtuvo un rango óptimo de funcionamiento de 5 a 15 mg/L de CAP. Finalmente, para evaluar la capacidad de remoción de olor y sabor, fue necesario el análisis por medio del estudio cromatográfico en el laboratorio CENIVAM, como resultado se confirma que la presencia del polímero y la variabilidad de las dosis de CAP influyen en la concentración y remoción de GSM. Como punto óptimo de aplicación se destaca la presedimentación junto con dosis bajas (< 2 mg/L) de CAP sin aplicación de polímero.

PALABRAS CLAVE:

Carbón activado en polvo, polímero, Geosmina y 2-Metilisoborneol

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Influence of Application of Activated Carbon Powder (CAP) On the Quality of Drinking Water for the Removal of GSM and MIB in two Operating Conditions (With and Without Assistant of Flocculation) for Bosconia Drinking Water Treatment Plant, Santander

AUTHOR(S): Dayanna Gáfaró Gelves
Gissela Navarro Nigrinis

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Alvaro Cajigas Cerón

ABSTRACT

This study is based on demonstrating the influence of the application of powder activated carbon -CAP on the quality of drinking water for the elimination of the terro-moldy flavor caused by the blooms of green-blue algae and its metabolites –GSM and MIB. Situation presented in the water distributed to part of the Bucaramanga Metropolitan Area by the Bosconia Potable Water Treatment Plant (PTAP). The simulation of the operation process of the Bosconia PTAP is carried out with the jar test as an experimental unit for the implementation of chemical and physical treatments on a laboratory scale. The simulated processes are sedimentation, flocculation and coagulation; applying the hydraulic retention times and revolutions per minute programmed in the equipment; according to the water flow of the treatment plant. Each experimental unit has the application of coagulant dose (Aluminum Sulfate), addition of polymers (depending on the situation) and concentration of CAP. Eight different variations of CAP (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35 mg / L) were applied at each point of the treatment train, in order to determine the best water quality conditions. Depending on the behavior of the response variables, pH and conductivity are discarded as quality parameters. The best results for turbidity and color were found at the presedimentation point without the addition of polymers, also was obtained an optimal operating range of 5 to 15 mg / L of CAP. Finally, to evaluate the odor and taste removal capacity, the analysis was necessary through the chromatographic study in the CENIVAM laboratory, as a result it is confirmed that the presence of the polymer and the variability of the CAP doses influence the concentration and removal of GSM. As an optimal point of application, presedimentation is highlighted along with low doses (<2 mg / L) of CAP without polymer application.

KEYWORDS:

Powder Activated Carbon, polymer, Geosmine and 2-Methylisoborneol

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

Los recursos hídricos son un aspecto fundamental y de control en las actividades de crecimiento de cualquier país. El nivel tecnológico y el manejo adecuado a la contaminación de las aguas por diversos orígenes tiene efectos adversos sobre la salud de los consumidores; esto debido al actuar del agua como factor de propagación de dichas enfermedades.

Una de las preocupaciones y foco de contaminación ocasional de la Planta De Tratamiento De Agua Potable Bosconia se da con la suma de condiciones tales como: el bajo nivel de caudal del río de abastecimiento, altas temperaturas en la zona, contenido de nutrientes y formación de zonas lenticas que generan la proliferación de algas verdeazuladas y que como subproductos intracelulares generan a la Geosmina (GSM) y 2-metilisoborneol (MIB), produciendo eventos de olor y sabor percibidas por el sentido del gusto humano a concentraciones muy bajas en rangos estimados entre los 10 ng/L y 20 ng/L (Aguilera, 2014).

Este problema de olor y sabor terro-mohoso que se imparte al agua potable, ha sido reportado en varios países dándose principalmente en épocas de verano, meses en los cuales se reúnen los requisitos que promueven estas proliferaciones indeseadas. De manera adicional, la presencia de estas algas en forma de colonias y sus endotoxinas; pueden causar problemas de taponamiento en equipos y ductos de distribución de la planta potabilizadora, así como un olor y sabor indeseables en el agua distribuida aun cuando la calidad del agua, estudiada por parámetros fisicoquímicos de color y turbiedad es aceptable y permitida según la legislación vigente.

Los tratamientos más comunes para la remoción de sabor y olor del agua son: oxidación, adsorción y membranas. Entre los productos a destacar se encuentra el uso de carbón activado

siendo una opción flexible, segura y que generalmente es efectiva según las condiciones problema; puede ser aplicado en cualquier punto del sistema de tratamiento: en el agua cruda, en la mezcla rápida, los floculadores o en filtros. (Zamora, R & Durán P., 2019)

Otaño et al (2017), estudiaron la dosis de carbón activado en polvo de 50 mg/L para tratar niveles de 2-MIB cuarenta veces más elevados que la concentración de referencia (100ng/L), demostrando que esta dosis es suficiente para obtener una remoción al nivel del umbral de detección, que varía entre los 10 ng/L y los 30 ng/L. Los autores plantean que estos resultados fueron óptimos posiblemente a factores como, la calidad del agua a tratar, el tipo de carbón utilizado y el tiempo en el cual el agua problema actúa con el mismo.

Con el avance en las técnicas y la modernización de las plantas potabilizadores, han surgido técnicas como las mostradas por Zamora & Durán (2019); que mediante pruebas en reactor discontinuo con base en la técnica “punto por punto” determinaron las isothermas de adsorción de cada carbón activado evaluado, en donde obtuvieron como resultado que el carbón activado -LQ1000 fue la mejor opción técnico-económica para la remoción de MIB; dadas las siguientes condiciones de operación y diseño: flujo de agua tratada de 1 m³/s, tiempo de contacto de lecho vacío (EBCT) de 17.5 min, tamaño de partícula de 12x40 y altura del lecho de 13.00 m.

Finalmente, Herrera (2018) determina las concentraciones adecuadas de carbón activado en polvo para eliminar el sabor y olor causado por GSM y MIB en la PTAR Bosconia, rangos que corresponden a 20mg/L, 30mg/L y 40mg/L, concluyendo que el pretratamiento es uno de los puntos de aplicación que garantiza la eliminación. El autor recomienda llenar vacíos de su investigación relacionados con el aumento necesario de la dosis de CAP que tiene consecuencias directas en los parámetros fisicoquímicos de color y turbiedad; evidenciando

que ciertas turbiedades fueron mayores a lo permitido por los estándares de calidad (IRCA), así como el color que tiende a aumentar a mayor dosificación de CAP afectando la tratabilidad del agua.

Con base al trabajo anterior mencionado y teniendo en cuenta la persistencia de la problemática de sabor y olor terro-mohoso en el agua distribuida por la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia, se buscó demostrar la influencia de la aplicación de carbón activado en polvo -CAP para la remoción de GSM y MIB y su incidencia sobre la calidad del agua potable servida en dos condiciones de operación (con y sin ayudante de floculación).

Capítulo 1

Objetivos

Objetivo general

Demostrar la influencia de la aplicación de carbón activado en polvo -CAP sobre la calidad del agua potable para la remoción de GSM y MIB en dos condiciones de operación (con y sin ayudante de floculación) de la planta de tratamiento Bosconia.

Objetivos específicos

- ✓ Evaluar el efecto del punto de aplicación de CAP sobre la calidad de agua al final del tratamiento mediante los parámetros de control de operación.
- ✓ Determinar la influencia de la concentración de CAP sobre la calidad de agua al final del tratamiento mediante los parámetros de control de operación.
- ✓ Evaluar el efecto de la remoción de Geosmina y MIB garantizando las dos condiciones de operación (con y sin ayudante de floculación).

Capítulo 2

Marco Teórico

Agua Potable

Catalogado como el solvente universal, presenta una transcendencia en la vida del ser humano, con sus múltiples usos para satisfacer necesidades humanas; su principal función corresponde al consumo. Las diversas actividades han generado modificaciones en las fuentes hídricas, aumentando el grado de complejidad del tratamiento de agua. La purificación del agua pertenece a los problemas de salud e higiene, que afectan directamente a la sociedad beneficiada. Ofrecer una demanda de agua potable requiere de múltiples factores; físicos y químicos, basados en la calidad del agua, supervisados por normativas como el caso de las características fisicoquímicas o bacteriológicas.

En este proceso se desprenden múltiples tratamientos acorde a las características del agua cruda. Debido a que no existe una fórmula que determine el tipo de planta que se usa para tratar el agua; el camino es realizar estudios en laboratorios por el tipo de población, tipo de agua, o plantas pilotos para diseñar una planta de tratamiento económica y eficiente.

Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia

Construida en Bucaramanga, Santander con el fin de mejorar el flujo de agua potable del área metropolitana, inicia la captura de agua del río Surata, con el propósito de provisionar el completo abastecimiento para su población. La ilustración 1 muestra el esquema de la PTAP Bosconia, siendo de tipo convencional con tanques desarenadores, pre-

sedimentadores, mezcla rápida, floculación mecánica, sedimentación, filtración y cloración, contando con una capacidad de 2000 L/s.

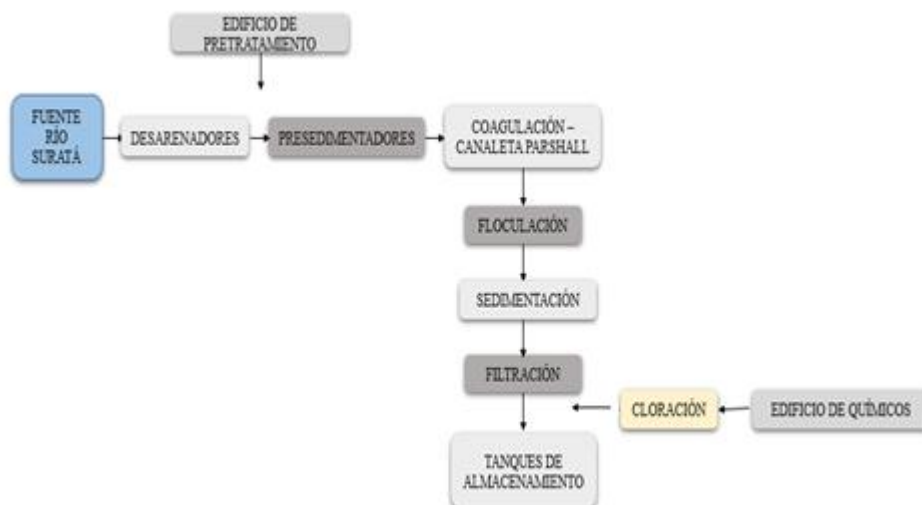


Ilustración 1. Proceso de Tratamiento de la Planta de Tratamiento de Bosconia

Fuente: Autoras

Normativa Colombiana

Regulada por el decreto 1575 de 2007, “El Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano”, para garantizar condiciones y características que permite ser consumida por la población. Presenta una guía con 40 parámetros fisicoquímicos con rangos estipulados que si se sobrepasan estos límites pueden afectar la población.

Decreto 1575 resolución 2125/2007

Los tratamientos convencionales generalmente cumplen parámetros de calidad, con el fin de mantener un entorno con las mínimas afectaciones al ser humano. “El agua de consumo humano debe ser transparente, sin color, sin sabor y no debe tener solidos suspendidos” (Ministerio de da Protección Social, 2007, p. 40). Este decreto tiene como función es la protección y control de la cantidad de agua en Colombia, proponiendo requisitos

organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos. Para este control se plantean dos tablas presentadas a continuación, con las características más importantes. Se encuentran especificados los valores máximos permisibles.

Tabla 1. *Características Físicas del Tratamiento de Agua Potable*

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	EXPRESADAS COMO	VALOR MÁXIMO ACEPTABLE
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

Datos obtenidos del decreto 1575 resolución 2125/2015 (Fuente: Ministerio de la protección social, 2007)

Características Fisicoquímicas del Agua.

Identificación por medio de análisis básicos y complementarios de los elementos, compuestos, sustancias y microorganismos presentes en el agua para consumo humano; por medio de procedimientos en laboratorio para las muestra de agua, que busca evaluar características como la turbiedad, color aparente, pH y conductividad; como resultado se obtienen valores numéricos expresados en rangos permisibles dentro de la normativa mencionada con anterioridad, que garantiza que el agua para consumo humano no representa riesgos conocidos a la salud humana.

Turbidez

Se clasifica comúnmente en altos o bajos niveles medidos en unidades de turbiedad nefelométrica (UNT) presentes en el agua cruda. La presencia de materia orgánica, sólidos desprendidos de la erosión del suelo y crecimientos algales, causan una dispersión coloidal

que absorbe los rayos de luz; impidiendo su continuidad a través del agua necesaria para la reproducción y oxigenación de la vida acuática. (Toro, 2011)

Los altos niveles de turbiedad son en consecuencia de los vertimientos por lluvias que desprenden materiales como arcilla, arena y materia orgánica del suelo. Este tipo de agua cruda, por causa de los desechos naturales puede ocasionar problemas sanitarios. Los vertimientos industriales y domésticos ocasionan una carga adicional aumentando la turbiedad de la fuente, siendo este tipo de descargas debido a la influencia de los vertimientos, la tratabilidad del agua indica tener un cierto grado de dificultad para el diseño y tratamiento del agua potable.

Análogamente los bajos niveles de turbiedad impactan positivamente en la salud de la fuente hídrica continuando con el flujo de oxigenación, aumentando el crecimiento algal, mejorando la temperatura del agua, entre otras consecuencias benéficas. (Marcó, L., Azario, R., Metzeler, C., & García, M. d. 2004). El agua con turbiedad baja en términos de diseño corresponde a una fuente sencilla para tratamiento, pero aun así requiere monitoreo de parámetros y características que en determinado momento requieran aumento en su tratabilidad.

Remoción de la turbiedad

Si bien es cierto la turbiedad tiene múltiples procesos para la reducción de compuestos orgánicos presentes en el agua cruda, por medio del tratamiento para el consumo de agua se han desarrollado múltiples técnicas mecánicas y químicas como los filtros o la adición de reactivos (coagulantes) para reducir la presencia de materia orgánica. En esta investigación se consideraron las directrices de funcionamiento de la planta de tratamiento de Bosconia,

haciendo uso del sulfato de aluminio como coagulante que junto con las etapas de floculación y filtración buscan obtener aproximadamente una remoción del 90% de turbiedad.

Con respecto a la adición de reactivos existen otros agentes coagulantes como el sulfato férrico, aluminato de sodio y cloruro férrico. Cada uno con un rango específico de pH. (FLÓREZ, 2010). Igualmente el uso de coagulantes alternativos han surgido en las últimas décadas, se encuentran una nueva generación de coagulantes inorgánicos prepolimerizados; incluyen policloruros de aluminio (PAC's), clorhidrato de aluminio (ACH) y poli sulfatos de aluminio (PAS), han mostrado un mejor desempeño comparado con los coagulantes convencionales como el sulfato de aluminio (alumbre) o cloruro férrico, siendo usados en tratamiento de aguas municipales y aguas residuales especialmente en Europa y Asia.

Color

Característica física que determina la participación de sustancias, materiales orgánicos e inorgánicos y presencia de organismos biológicos como plantas, fitoplancton, microorganismos que se encuentran suspendidos en el ecosistema acuático. El color puede presentarse por definición en dos conceptos; color aparente y color real. Para el primer caso se evidencia en muestras que en su recolección no pasen por un filtro de 0.45 micras, con presencia de materia orgánica suspendida y disuelta de origen natural que interfiere con la calidad del agua. El color real se determina después de un tratamiento químico, mecánico o hidráulico, cuyo propósito es la eliminación de la turbiedad.

El color se mide por Unidades de Platino Cobalto (UPC), esta escala estándar se logra al disolver un mg de platino/L en forma de ion cloroplatinato; se determina mediante la comparación de la colorimetría de soluciones. (Gómez, 1995)

Sabor y olor

Según la Organización Mundial de Salud (OMS), hay cuatro sabores básicos perceptibles: ácido, dulce, salado y amargo, producidos por factores naturales, mismos que son generados por una lista de contaminantes en donde se identifican otras variedades de sabor y olor, destacándose la Geosmina y el MIB, contaminante que motiva este proyecto de investigación y que generan en el sentido perceptivo del consumidor un sabor y olor a tierra y moho en concentraciones entre 5 y 10 nanogramos por litro (ng/L) (Sarmiento, 2015).

Al producirse brotes de algas, bacterias y cianobacterias en el agua, se generan de forma natural productos químicos que alteran la calidad estética del agua y en algunos casos estos productos químicos pueden incluir toxinas. La formación de poblaciones algales suele florecer dependiendo del tiempo meteorológico, para la primavera e invierno florecen las algas marrones con olor a pescado y en verano u otoño el crecimiento es para brotes de olor y sabor a tierra y moho.

Esta situación se ha presentado en las diferentes plantas de tratamiento de agua potable a nivel mundial, marcando una dificultad en el tratamiento debido a que las soluciones para tratar los problemas de olor y sabor requieren del uso de carbón activado en polvo (CAP), siendo necesario una evaluación del efecto de la aplicación de este sobre la calidad del agua en términos de características fisicoquímicas. Para su óptimo funcionamiento en remoción de estas partículas indeseadas se requieren dosis elevadas de CAP, influyendo en la factibilidad económica y en los procesos del tren de tratamiento.

Existen otras alternativas como la aplicación de ozono, la oxidación con luz UV y peróxido de hidrogeno, que a diferencia del carbón activado son técnicas más costosas y con

limitaciones, dependiendo su efectividad de condiciones y propiedades químicas del agua muy específicas.

pH

El agua es una sustancia con una composición química que tiene diferentes reacciones con respecto a la influencia de las características antes mencionadas, generando un equilibrio o desequilibrio en el ecosistema acuático, por esto se le da prioridad al potencial de hidrogeno (pH) que es medido en una escala del 1 al 14, con 7.0 considerado como neutro. Las soluciones con un pH por debajo a 7.0 se consideran ácidos y las soluciones con un pH por encima de 7.0 hasta 14.0 se consideran bases o alcalinos.

Esta característica influye directamente en la aplicación de tratamientos químicos para el agua. Las circunstancias adecuadas de pH influyen en las operaciones debido a la hidrolisis que se genera con la liberación de los iones hidrógeno, de esta manera para una adecuada mezcla de las sustancias químicas con el agua, el pH es una condición inicial de monitoreo que como consecuencia tendrá una óptima función de los coagulantes y floculantes. Existe una relación directa entre el pH y el uso del carbón activado, según (Brito, 2007) para pH bajos, la adsorción del carbón activado es mayor por la carga positiva del carbón debido al ion hidrogeno, conservándose la carga negativa en coloides y en la mayoría de los grupos de ionización polar en moléculas orgánicas.

Para un análisis del agua es importante medir el pH que presenta la muestra, puede evidenciarse una acidez, una alcalinidad o una dureza; cada estado depende de la composición de las sustancias presentes en el agua. (Valero, M. C., & Cruz, L. E. 1999)

La acidez en el agua con pH menor a 6.5 puede llegar a ser corrosiva, esta agua podría disolver iones metálicos como el hierro, cobre, plomo y llegar a causar daños en accesorios de plomería y tuberías, se asocia también a problemas estéticos como el sabor metálico o amargo.

El agua alcalina con pH mayor a 8.5 puede presentar problemas de incrustaciones por dureza, no representa un riesgo para la salud, pero causa problemas como la formación de sarro que precipita en tuberías y accesorios. La Dureza se genera por cationes metálicos, que se define también como la suma de las concentraciones de los iones calcio y magnesio. (Gómez, 1995)

Conductividad

Se conoce como la habilidad de una solución para conducir electricidad en este caso el agua, se compone de pequeñas partículas cargadas eléctricamente, llamadas iones, que pueden llevar una corriente eléctrica a través de soluciones de agua. Los iones provienen principalmente de los ácidos y sales de la solución de fuente. A mayor concentración el número de iones se incrementa y de la misma manera aumenta la conductividad. Esta característica es medida en micro siemens por centímetro (Rodríguez Johel, 2009).

Cianobacterias como productores de Geosmina y MIB

Es importante destacar que las cianobacterias, son parte del inicio de la cadena alimentaria que habita todas las aguas del planeta, presentan una diversidad estructural siendo esta la base de los diferentes grupos taxonómicos, se conocen también como algas verde azuladas y sus agrupaciones en el agua son llamadas generalmente como “florecimientos”, este último

se describe en la literatura como el aumento significativo de la biomasa, que se produce principalmente en épocas de verano y en horas en donde la incidencia de la luz es mayor.

Estos florecimientos de cianobacterias representan un problema para los cuerpos de agua, teniendo implicaciones en el uso de actividades humanas; se debe principalmente al incremento en la producción de metabolitos causantes de olor y sabor, así como la posibilidad de generación de toxicidad, con un efecto letal sobre los organismos presentes en el cuerpo hídrico y la población humana que se suple de esta fuente afectada. Se relacionan generalmente con una o dos especies y se identifican por el tipo de fitoplancton dominante, entre los que se encuentran la Geosmina (GSM) y 2-metilisoborneol (MIB), en su mayoría asociadas con el olor y sabor terro-mohoso que se produce en el agua (Corrales et al, 2017).

Geosmina y MIB

La Geosmina (GSM) o Trans-1,10-dimethyl-trans-9-decalol con estructura molecular como la presentada en la ilustración 2 por Varian (2010), fue identificada en 1965 en primer lugar presente en actinomicetos y después en cianobacterias, en el año 1967 se identifica como componente principal del olor terroso en suelo y agua. Se deriva de las palabras griegas “ge” y “osme” que significan tierra y olor respectivamente.

La Geosmina y MIB como metabolitos de las cianobacterias poseen facilidad de crecimiento favoreciendo su aparición en el suelo y en el medio acuático, en condiciones tales como:

- ✓ Ambientes de aguas dulces alcalinas o neutras con pH elevados.
- ✓ Concentraciones altas de nitrógeno con relación $N/P < 16$ en forma de nitrato, amoníaco y fosforo mayor de 40 ug/L.

- ✓ Temperaturas entre 15 y 30 °C siendo las óptimas para el florecimiento.
- ✓ La exposición a la luz, pero no de forma excesiva, ya que se puede degradar su aparato fotosintético, resultando en una foto inhibición.

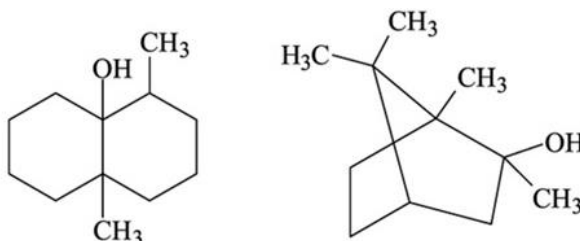


Ilustración 2. Estructura Molecular Geosmina y 2-Metilisoborneol Respectivamente

Fuente: Varian, 2010

Métodos de remoción de Geosmina y MIB

Existen diferentes tipos y técnicas correctivas para los problemas de olor y sabor generadas por la presencia de cianobacterias, los métodos físicos, destacan procesos como la limpieza mecánica de los instrumentos o estructuras afectadas por los florecimientos, la adsorción de carbono, perturbación ultrasónica y la radiación ultravioleta; estas dos últimas generalmente requieren de instrumentos costosos, demandan mucho tiempo y su disponibilidad, solo se da en cuerpos de agua de pequeña escala, haciendo que estas técnicas sean fácilmente descartadas para las plantas potabilizadoras de agua debido al volumen de agua a tratar.

Seguido a esto se encuentra el tratamiento químico, los alguicidas utilizados generalmente incluyen compuestos de metales pesados, prooxidantes y aminas orgánicas, factibles económicamente, pero con índices tóxicos de amplio espectro para los organismos acuáticos. Por último, la manipulación biológica haciendo uso peces, zooplancton, epífitas,

actinomicetos, bacterias, cianófagos, macrófitas, entre otros, para el control de forma directa o indirecta de la biomasa de estas algas problema (Hu y Hong, 2008).

Remoción por métodos físicos

El mayor reconocimiento dado a las técnicas físicas se debe a su grado mínimo de contaminación posterior o consecuencias leves en el medio en el que se usa, cabe destacar que algunos de estos tratamientos utilizan gran cantidad de energía, pero son de gran aplicabilidad en campo debido al balance efectividad-economía.

Remoción y reducción de la entrada de nutrientes

Cuando se habla de mitigación de las floraciones problema, el primer paso técnico es la eliminación o reducción de la entrada de los nutrientes que facilitan su crecimiento, de esta manera se ha observado que la primer barrera de contención que se maneja en una planta de tratamiento de agua potable es la reducción de la entrada de fosforo (P), siendo un medio eficaz para reducir la presencia de las cianobacterias, así como también se necesitan reducciones de la entrada de nitrógeno (N), este último especialmente cuando los cuerpos hídricos como lagos, ríos, estuarios y aguas costeras eutróficas son capaces de asimilar más N aumentando su estado trófico.

A pesar de que se busca una entrada en la que los florecimientos tóxicos no se favorezcan sobre otros no tóxicos, no existe una relación controlada que pueda ser constante y confiable entre aquellas floraciones. Generalmente las proporciones molares totales de N:P por encima de ~15 inhiben la presencia de las cianobacterias. (Paerl y Otten, 2013; Paerl, 2014).

Radiación ultrasónica

La radiación ultrasónica en el agua genera ciclos de compresión y rarefacción que conducen a la producción de burbujas de cavitación (cavitación acústica). Estas burbujas en gran cantidad implosionan creando como resultado temperaturas localizadas de hasta 5000 °C, presiones de 100 MPa y radicales libres. Entre los efectos principales de la cavitación, se encuentra la afectación negativa en la tasa de crecimiento de cianobacterias, esto por medio de la ruptura o colapso de vesículas de gas, disrupción de la membrana, daño a la actividad fotosintética e inhibición de la división celular.

La sonicación se ha utilizado como método de control para floraciones de cianobacterias en agua eutrófica, demostrando que el ultrasonido, ondas con frecuencia igual o superior a 20 kHz, tiene un impacto negativo en el estado estructural y funcional de los organismos. (Rajasekhar et al., 2013).

Carbón Activado en Polvo (CAP)

El carbón, un mineral con una estructura cristalina reticular estable que es combinado con otros elementos, es el resultado de la descomposición de la materia de hace muchos años atrás. Clasificado por tres tipos básicos; cada uno con una respectiva concentración de carbón. En primer lugar, con el menor valor calórico se encuentra el lignito, con un porcentaje de 30% de carbón (TAR, 2010). La compresión del primer tipo de carbón se origina de la hulla, que luego procede a transformarse en el carbón con más valor calórico, apreciable para las plantas de energía y que se conoce como antracita.

La activación del carbón se lleva gracias a un proceso de transformación que requiere de carbonización y un proceso de pirólisis del material. Este presenta características adsorbentes debido a su estructura química, que genera la propiedad de atraer y atrapar moléculas pequeñas como olores, sabores y tipos de solventes (TAR, 2010). Gracias a la presencia de capas de carbono hay interacción con grupos de diferente concentración ácida o básica.

El carbón activado está acompañado de fenómenos que ocurren debido a su área superficial disponible y la relación que tiene con la porosidad. Uno de los fenómenos es la polaridad generada por los electrones desapareados y valencias insaturadas, su naturaleza apolar retiene moléculas apolares y de alto volumen molecular; de este modo el proceso de adsorción depende del área de contacto. Se distinguen tres tipos de poros:

- Microporos: Menores a 2 nm, su estructura es ideal para adsorber olor, sabor y compuestos volátiles.
- Macroporos: Mayores a 50 nm, corresponden a sustancias húmicas que se generan al descomponer la materia, es decir para los coloides que se presentan en el agua cruda.
- Meso poros: entre 2 y 50 nm, característica para partículas intermedias de las dos primeras clasificaciones de los poros. Clasificación extraída de la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists).

Aplicaciones del carbón activado

Se emplean en el tratamiento de agua potable para la eliminación de contaminantes orgánicos o con problemas de olor, color y sabor en el agua. En la ilustración 3 de Correa (2016), se pueden observar la estructura interna del CA, características responsables de la

purificación y decoloración del agua u otros líquidos o gases que entren en contacto con este elemento.

Puede obtenerse de diferentes fuentes de materias primas, tales como: carbón bituminoso, cáscara de coco, lignito, turba y antracita. Cada uno con un sistema respectivo de extracción y fabricación generando como resultado tipos de carbón activado; (Brito, 2007) para el tratamiento de agua se emplean solamente dos tipos, en polvo y granulado.

Carbón pulverizado: La transformación en consecuencia da como resultado partículas pequeñas, con resultados más favorables con relación a que tiene un área-volumen alta, indicando el fenómeno de adsorción de mayor efectividad, pero genera una baja velocidad de sedimentación. (Brito, 2007)

Carbón granular: Es empleado para plantas de tratamiento de agua en forma de lechos de adsorción y en donde el agua pasa a través de un filtro a presión. (Brito, 2007).

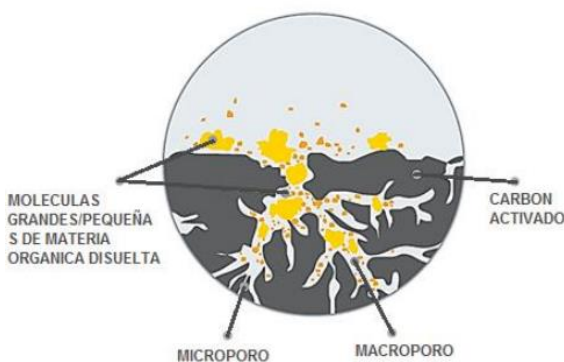


Ilustración 3. Estructura Interna del Carbón Activado.

Fuente Correa, 2016

Funciones de la aplicación de carbón activado en el agua

Se destacan algunas de las aplicaciones más importantes del carbón activado:

- Mejorar las propiedades organolépticas en el agua.
- Reducir los riesgos para la salud.
- Prevenir daños a las membranas de ósmosis inversa y a las resinas de intercambio iónico.
- Tratamiento terciario de aguas residuales.
- Tratamiento para el agua de proceso industrial de alta pureza.
- Pretratamiento de agua industrial.
- Purificación de aire y gases.
- Tratamiento de emisiones atmosféricas.
- Eliminación del cloro libre en el agua potable.
- Mascarilla de gases.
- Depuración de aguas para piscinas.
- Decoloración de vinos, zumos y vinagres.

Adsorción con carbón activado

Es importante subrayar que la adsorción es la remoción de partículas, moléculas, materia orgánica y los coloides del agua, por medio de una atracción entre partículas que es debido a las fuerzas moleculares. Razón por la cual para el tratamiento de agua se usan ciertos adsorbentes como: el carbón activado, resinas adsorbentes de intercambio iónico, óxidos metálicos, hidróxidos, carbonatos, alúmina activada y arenas. En consecuencia, el uso del carbón activado se determina como adsorbente, siendo evaluada su efectividad con respecto a su dosis y su punto de aplicación.

Para (Hilleboe H. E., 1995) la aplicación de carbón al agua cruda disminuye la descomposición de depósitos de lodo en los estanques de sedimentación, pero para el contacto en la superficie de los filtros el carbón es más efectivo para remover sabor y olor. Puede ser aplicado antes o después de la coagulación, pero siempre anterior a la filtración.

Depende del mejor indicio que aumente la calidad del agua y disminuye los porcentajes de remoción de olor y sabor. Con este aspecto hay que considerar que la efectividad del carbón está influenciada por su punto de aplicación y por la dosis de este. No obstante aplicar cantidades grandes durante cortos períodos a cada filtro individualmente es un proceso ideal, teniendo como ventaja que en el lecho del filtro no hay una gran cantidad de carbón activado.

Etapas del tren de tratamiento

Para la selección de los puntos de aplicación del carbón a escala laboratorio, se hizo una revisión bibliográfica en base de la problemática principal de este proyecto de investigación, así mismo se buscó replicar el estudio hecho por (Herrera, 2018), tomando los mismos puntos de aplicación usados en su investigación.

Presedimentación

Proceso físico mediante el cual las partículas suspendidas presentes en el agua son removidas o separadas del fluido gracias al efecto de la gravedad; por ende, dichas partículas deberán ser más densas que el agua. Este proceso se consigue dejando sedimentar el agua, filtrándose o como complemento de la otra, de esta manera se obtiene un fluido clarificado y una suspensión más concentrada.

Coagulación

Es una de las etapas importantes de la secuencia que compone el tratamiento de agua potable. Se busca formar coágulos constituidos por partículas que se encuentran en suspensión en el agua; esto gracias a la aplicación de sustancias químicas como los mencionados coagulantes. (Puentes, 2005). Este proceso dispone de una cadena de efectos

fisicoquímicos mediante el cual su objetivo fundamental es generar una desestabilización de las partículas coloidales. Se pueden identificar varios mecanismos de coagulación, como la doble capa, neutralización de cargas por adsorción, coagulación por barrido y puente inter-partículas, entre otras. (Puentes, 2005)

La interacción del coagulante depende del contaminante, sin olvidarse del pH óptimo al cual se desarrolla adecuadamente la coagulación. Para las sales de aluminio o sales férricas se genera mediante la hidrólisis una reacción muy común con el agua, este tipo de reacciones involucran acciones benéficas para la purificación, puesto que la neutralización de cargas del coagulante con el contaminante ayuda a un alto grado de remoción de materia orgánica (MO).

Este proceso suele ser muy utilizado debido a su balance economía y eficacia, siempre que se mantenga una gestión adecuada de las dosificaciones del coagulante y el tiempo de retención hidráulico estimado para la producción de la planta.

Factores que influyen en la coagulación

Según Andía (2000), para optimizar el proceso de coagulación se deben tener en cuenta los siguientes factores:

pH: se da en función del tipo de coagulante a ser usado, así como de la naturaleza del agua a tratar; si se realiza fuera del rango de pH óptimo la dosis de coagulante requerida es alta. Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6.5 a 8.0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5.5 a 8.5 unidades.

Temperatura: La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la variación de la densidad del agua, por lo que la coagulación se hace más lenta; de la misma manera

temperaturas muy elevadas no ayudan a la coagulación debido al aumento de su viscosidad; explicando las dificultades de la sedimentación del floc.

Dosis de coagulante: La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación.

Poca cantidad del coagulante no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de micro flóculos es muy escaso, por lo tanto, la turbiedad residual es elevada.

Alta cantidad de coagulante conduce a la formación de gran cantidad de micro flóculos con tamaños muy pequeños y velocidades de sedimentación muy bajas, por lo tanto, la turbiedad residual es elevada.

Floculación

Después del proceso de coagulación se programa la floculación con el fin de aumentar el volumen y peso del floc; se genera gracias a la neutralización por la velocidad del gradiente dándole a las partículas una velocidad de sedimentación más rápida. Normalmente cuenta con tiempos de retención entre quince y cuarenta y cinco minutos, este lapso depende de las dimensiones del floculador y el caudal de la planta. (Hilleboe H., 2007)

Coloides

Los coloides están ligados a una estabilidad coloidal que depende de la persistencia de la partícula en el solvente, esta estabilidad requiere de una fuerte fuerzas eléctricas categorizada como: las fuerzas de Van der Waals, en el cual se genera una atracción entre las partículas coloidales generando un aumento en la estabilidad coloidal. Las fuerzas estéricas, generada por dos partículas superpuestas generando capas difusas impidiendo la unión de estas. Las

fuerzas estéricas secuenciada por medios no polares participando en enlaces de electrones del mismo elemento que se comparten de igual manera.

Propiedades de los Coloides

Evidentemente la estabilidad de una partícula coloidal es natural, es por esto por lo que su sedimentación requiere de un procedimiento que depende de sus propiedades cinéticas, ópticas y electrocinéticas.

Cinéticas: tres principales comportamientos que dependen del movimiento de la partícula coloidal. Movimiento Browniano, difusión y la presión osmótica. Para el primer caso se requiere de colisiones entre las moléculas que dependen de la temperatura del líquido. Por consiguiente, a este movimiento causado por la cinética de la temperatura le sigue la difusión, generada por la dispersión de las partículas en el líquido. Por último, la presión hidrostática participara para detener el flujo del disolvente a través de la membrana, con el fin de generar un estado de equilibrio. (Arreola, 2015)

Electroforesis: Una medida de movilidad del comportamiento eléctrico de los coloides al migrar hacia el polo opuesto de un campo eléctrico. Tiene relación con la potencial zeta ya que permite calcularlo.

Partículas en suspensión

Para un correcto análisis de aguas es importante determinar el comportamiento de los componentes presentes y dispersos en una fuente de agua. Usualmente las fuentes de aguas superficiales están compuestas por partículas suspendidas de diferentes tamaños que se han categorizado a través del tiempo. El enfoque en este proyecto abarca las macropartículas y

las partículas coloidales, que con respecto a su tamaño pueden afectar la dispersión de una solución.

Polímeros

Es un monómero con gran peso molecular, utilizado como ayudante de floculación con el objetivo de conseguir un flóculo con más peso y poder ser decantado. (Ebeling, Rishel, & Sibrell, 2004). Debido a sus propiedades aniónica y catiónica, el polímero es preparado en solución con agua destilada ya que generalmente exhiben bajas tasas de difusión y viscosidades elevadas; es necesario dispersar mecánicamente (agitador) el polímero en agua con temperatura elevada para evitar el “efecto de bola de pelo” que es generado por la formación de cadenas de los puentes del polímero (*Ver ilustración 4*).

Se emplea en las plantas de tratamiento como en la de Bosconia de Bucaramanga cuando hay problemas de olor y sabor o en épocas en las que la floculación tiene dificultades ya sea por condiciones como la turbiedad o temperaturas bajas. Es importante tener en cuenta que el uso excesivo de este producto causa una inversión de las cargas de las partículas haciendo que estas se dispersen.

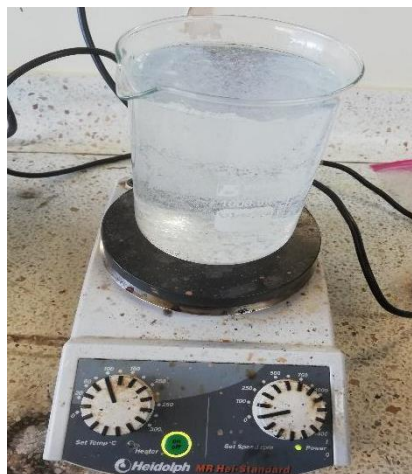


Ilustración 4. Agitación Mecánica de la Solución Polímero.

Fuente: Autoras

Según Trujillo et al (2014), los polímeros tienen tres tipos de acciones, coagulación, formación de puentes entre partículas y la formación de colas que conectan varias partículas.

Algunas de sus ventajas son: (Ebeling, Rishel, & Sibrell, 2004).

- | | |
|--|--|
| ✓ Requiere dosis más bajas de coagulante | ✓ Los polímeros unen muchas partículas más pequeñas. |
| ✓ Reducción de la producción de lodos | ✓ Resistencia al floc mejorada a las fuerzas de corte. |
| ✓ Fácil almacenamiento y mezcla | |
| ✓ No requiere ajuste de pH | |

Mecanismos de acción del polímero con la coagulación y floculación

Hay muchos beneficios que se evidencian al emplear el polímero con la coagulación y la floculación, las cuales dependen del manejo de operación de la planta de tratamiento.

Los mecanismos de adsorción por medio la coagulación con el polímero es:

- La interacción electrostática: La atracción de cargas permite una adsorción del polímero en la superficie del coloide, esta permanece activa hasta que se genera una neutralización y, por consiguiente, una reducción de la repulsión entre los dos compuestos mencionados.
- Enlace de hidrógeno: Es el resultado entre dos átomos uno de hidrógeno y un átomo de nitrógeno, oxígeno o flúor que se encuentran unidos covalentemente.

Los mecanismos de adsorción por medio la floculación con el polímero es:

- Adsorción y puentes: La adición de monómeros con cadenas largas generan puentes químicos entre las partículas en el cual pueden adherirse a la superficie coloidal para generar una mejor aglomeración y decantación. (Arreola, 2015)

Formación del polímero con la superficie coloidal

La interacción del polímero con el coloide no mantiene un contacto constantemente, esta relación también interactúa con la solución en la que se encuentra presente. Existen segmentos adsorbidos en la superficie coloidal como existen segmentos que no. Los trenes son los segmentos adsorbidos de la partícula coloidal con el polímero, los extendidos hacia la solución son bucles y las terminaciones del polímero son cabos.

Estas relaciones son utilizadas para formar puentes entre otras partículas que utilizan el polímero, es decir los bucles y los trenes son los principales encargados de formar los puentes químicos. Esta característica promueve el crecimiento del flóculo ya que se adhiere una con otra, de este modo estos puentes dependen de la cantidad de segmentos libres es decir bucles.

Este flóculo crecerá hasta generar un tamaño de equilibrio el cual dependerá de la agitación realizada en el tratamiento.

Prueba de Jarras

Los procesos que se generan en una planta de tratamiento pueden ser simulados en la prueba de jarras a escala laboratorio, esto con el fin de analizar el comportamiento del agua en los procesos como: la coagulación, floculación y sedimentación. También puede ser apropiada para la reacción y selección de dosis de químicos que ayudan a la potabilización del agua. Esta prueba está condicionada por medio de un equipo programado para la velocidad de los gradientes.

Capítulo 3

Metodología

Ubicación Experimental y Consideraciones Iniciales

Las pruebas de estudio se realizaron en el laboratorio de agua potable del edificio K de la Universidad Pontificia Bolivariana, simulando el tren de tratamiento de la PTAP Bosconia de Bucaramanga en una unidad experimental con una prueba de jarras. Posteriormente para la determinación de GSM & MIB se hizo uso del método de cromatografía de gases del laboratorio de la Universidad Industrial de Santander.

Tipo de muestra

Muestra tomada del río Suratá, fuente de abastecimiento de la PTAP Bosconia, el agua cruda fue extraída en un punto localizado en la entrada de la planta de tratamiento.

Descripción de la unidad experimental

El proceso de potabilización es un sistema integrado que consiste en múltiples tratamientos químicos y físicos, que fueron implementados a escala de laboratorio por medio de una simulación del tren de tratamiento utilizando las mismas condiciones de operación de la PTAP Bosconia (*Ver tabla 2*). Los procesos simulados fueron: sedimentación, floculación y coagulación; estos se lograron por medio de los tiempos de retención hidráulica y las revoluciones por minuto programadas en el test de jarras que fueron determinadas según el caudal de la planta de tratamiento. Cada proceso estuvo predispuesto a la aplicación de la dosis de coagulante (Sulfato de Aluminio), adición del polímero y una concentración de carbón activado en polvo -CAP.

Tabla 2. Condiciones de operación en PTAP.

TREN DE TRATAMIENTO	SIMULACIÓN EN EL LABORATORIO				
	TRH (min)	RPM			
Presedimentadores	10	0			
Canaleta Parshall –coagulación	1	300			
Floculadores	26	50	37	38	25
*simulación 4 floculadores	*6.5 por floculador				
Sedimentadores	10	0			

Nota: (Fuente: Edwing herrera, 2018)

La unidad experimental se estableció como un reactor de un 1 litro de volumen de agua del afluente de la PTAP. (Ver Ilustración 5).

Teniendo en cuenta la problemática de GSM & MIB y sus afloramientos en épocas específicas del año que se asocian a tiempo secos, centran la prueba en un rango de turbiedad de 10 a 40 UNT característico de esta estación.

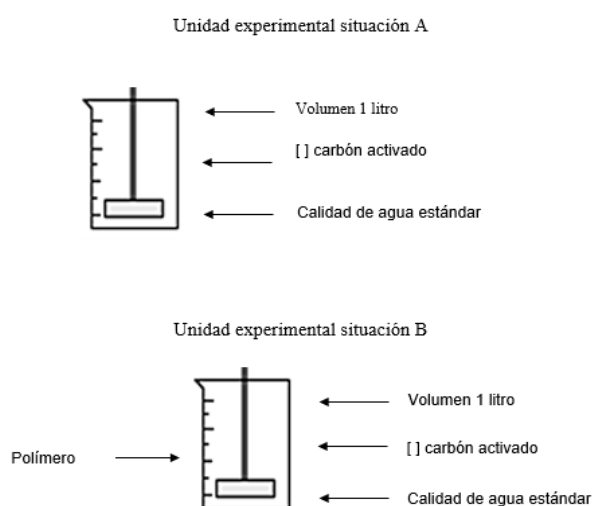


Ilustración 5. Situaciones de la unidad experimental

Fuente: Autoras

Factores y niveles de la unidad experimental

Este proyecto evaluó múltiples condiciones de tratamiento de agua potable abarcando las variables dependientes e independientes que indicaron una variabilidad en el proceso. Estas condiciones se clasificaron siendo el factor una condición fija y los niveles las variaciones que tendrán los respectivos factores para que cada bloque realizado.

Factores del diseño experimental

Son las variables dependientes cuantitativas:

- Punto de aplicación, correspondió a las zonas donde se realizó la aplicación de carbón activado.
- Concentración, cantidad de dosificación de carbón activado que fue aplicado en cada una de las unidades experimentales.
- Polímero, ayudante de coagulación y floculación empleado en la unidad experimental de acuerdo con las condiciones establecidas por la planta de tratamiento.

Este proyecto manejó dos formas y análisis para cada factor:

1. Punto de aplicación

Ho: La calidad del agua no depende del punto de aplicación.

H1: La calidad del agua si depende del punto de aplicación.

2. Concentración de CA

Ho: La calidad del agua no depende de altas concentraciones.

H1: La calidad del agua depende de altas concentraciones.

3. Adición del polímero

Ho: La calidad del agua no depende de la adición del polímero.

H1: La calidad del agua depende de la adición del polímero

Niveles del diseño experimental

Número de variaciones que tuvo cada uno de los tres factores trabajados:

El nivel 1 correspondió a los diferentes puntos de aplicación de la dosis de CA, determinados a partir de la revisión bibliográfica del estudio realizado por HERRERA, 2018. Como resultado se trabajaron los procesos de presedimentación (PA1), coagulación (PA2) y floculación (PA3).

El nivel 2 contó con ocho (8) concentraciones de CA, (*Ver tabla 3,*) incluida la concentración testigo, elegidas por medio de revisión literaria de la siguiente manera:

Tabla 3. Concentraciones Establecidas De CAP.

Número	Concentración Carbón activado [Mg/L]
C1	Testigo
C2	5
C3	10
C4	15
C5	20
C6	25
C7	30
C8	35

Nota: Variaciones de carbón activado en polvo en las cuales se manejan unas mejores condiciones de turbiedad. (Fuente: Autoras)

Por último, el nivel 3 siendo la adición del polímero según las condiciones de aplicación en la planta, fueron numeradas como P1 para aquellas muestras con aplicación de polímero y P2 sin la aplicación del polímero.

Aleatorización de factores y niveles

La sumatoria de los seis reactores de la unidad experimental, (*Ver ilustración 6*), formaron lo que se conoce como equipo de prueba de jarras, de esta manera se dispuso de cuatros equipos que simularon los tres diferentes puntos de aplicación y ocho concentraciones variables de carbón activado.



Ilustración 6. Sistema del Equipo Jarras.

Fuente: Autoras

El estudio se realizó para dos grupos de datos, siendo la adición del polímero el aspecto divisorio, como resultado se obtuvieron cuatro bloques con un total de 192 unidades experimentales aleatorias.

Con el objetivo de maximizar las diferencias entre los cuatro (4) bloques resultantes, se realizó una aleatorización que evitó el sesgo y fue fundamental para el posterior análisis de datos. Como resultado se obtuvo una combinación factorial de fórmula $PA_i + C_j + P_k$ de los factores y niveles explicados anteriormente, a continuación, se explica gráficamente, (*Ver ilustración 7*), la composición de la combinación:

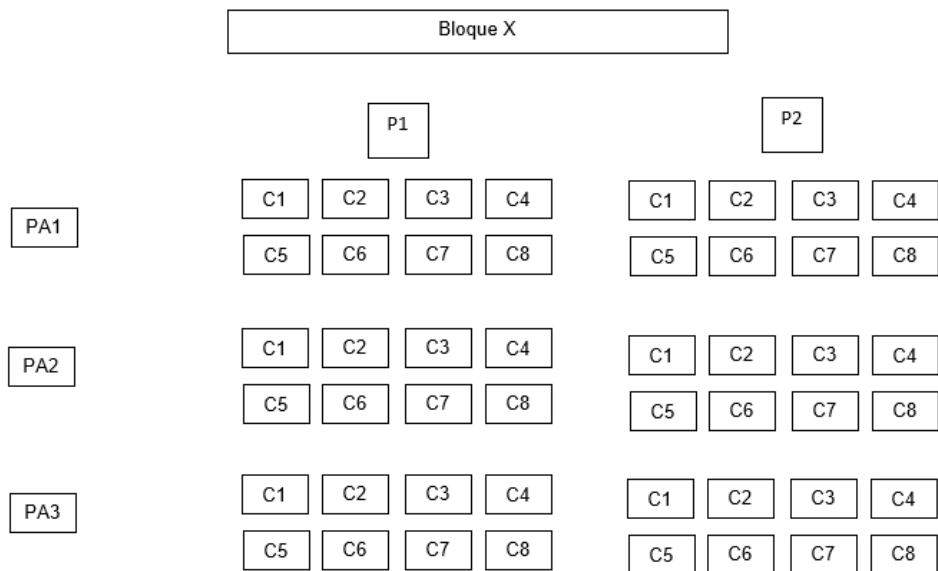


Ilustración 7. Contenido del Proceso de Aleatorización.

Fuente: Autoras

Por cada bloque se generaron veinte y cuatro unidades experimentales para el factor P1 (Con polímero) y veinte y cuatro unidades experimentales para el factor P2, cada factor contó con una repetición, para un total de 96 unidades experimentales; fueron trabajadas en 24 reactores individuales con una nomenclatura establecida por los autores y con una aleatorización que indicó el orden de la aplicación de la fórmula mencionada con anterioridad.

Condiciones Estadísticas Analizadas

Se definieron las variables dependientes como aquellas que estuvieron sujetas al cambio o se vieron afectadas por la manipulación del experimentador, en este caso las variables de respuesta fueron el pH, turbiedad, color y conductividad; consideradas cuantitativas debido a sus magnitudes numéricas cuyos resultados fueron medidos y analizados por medio de la

media, la desviación estándar. Por otra parte, la concentración de carbón activado, Geosmina, MIB y los puntos de aplicación se consideran como las variables independientes.

Análisis de Datos

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, se hizo un análisis descriptivo y estadístico; para el descriptivo se presentaron los resultados de las pruebas de jarras según las características fisicoquímicas que evaluaron la calidad del agua servida y que posteriormente fueron segmentadas de acuerdo con la presencia o no del ayudante de coagulación (polímero).

El estadístico se formó de un paquete de 384 datos arrojados por la aleatorización de los resultados de la prueba de jarra. Posteriormente, se trabajaron los datos de la siguiente manera: para el caso de dos características se realizó el análisis de varianza por *T DE STUDENT* y para tres o más características se analizó por medio de la *DISTRIBUCIÓN F*; esto con el fin de cotejar la hipótesis nula en la que todas las medias de las pruebas de jarras son iguales, contra la hipótesis alternativa siendo al menos una media diferente. (*Ver anexos*) La igualdad de varianza se tomó con un error <0.05 , el “P value” calculado en cada uno de estos paquetes es <0.05 con un rango máximo de 0.10, por lo tanto, la hipótesis nula fue rechazada, comprobando que sí existe diferencia significativa en los factores punto de aplicación y dosis de carbón activado.

A continuación, se explica el análisis posterior de cada uno de los objetivos:

- Punto de aplicación. Se hizo análisis por medio de *Distribución F*, en donde se descarta estadísticamente que las características fisicoquímicas de pH y conductividad sean usadas como criterios de calidad para el agua cuando se presentan problemas de

GSM & MIB, de esta manera se analiza el PA y su comportamiento a lo largo del tren de tratamiento por medio de las características de turbiedad y color.

- Dosis de carbón activado: Al igual que con el factor de punto de aplicación se analizó estadísticamente por *Distribución F*, confirmando que las características de pH y conductividad no son útiles debido a la similitud de sus resultados. Se analiza la adición de este componente y cómo se comportan las características de turbiedad y color con las diferentes concentraciones usadas en el laboratorio.

Adicional a los objetivos planteados en esta investigación, el análisis estadístico permite comparar el efecto que tienen los factores anteriores mencionados cuando interactúan entre sí, arrojando diferentes comportamientos tanto positivos como negativos en cuanto a las características de calidad (turbiedad y color).

Como resultado de esta interacción se establecieron rangos de funcionamiento óptimo del carbón activado de 5 a 10 mg/L, de los cuales se seleccionaron las dosis enviadas al laboratorio CROM-MASS; estas concentraciones son 0, 2, 5 y 10 mg/L de CAP. Esto con el fin de evaluar el contraste del comportamiento de la calidad del agua entre las dosis bajas y altas del rango elegido según el análisis estadístico. Se ratifica junto con los operadores de la PTAP Bosconia que este rango de dosis son las más consideradas en el proceso de operación de la planta cuando hay presencia de GSM & MIB.

- Determinación Cuantitativa Geosmina y 2-Metilsoborneol: De acuerdo con los resultados obtenidos por las pruebas de jarras, se seleccionaron 4 concentraciones de CAP replicando las condiciones de agua con adición y sin adición de polímero para un total de 24 muestras a analizar. El laboratorio de la Universidad Industrial de Santander -CROM-MASS con el equipo *Agilent Technologies 7890A*, precisó los

valores de GSM y MIB de las muestras de aguas seleccionadas como las más significativas. Por medio del uso de un detector selectivo de masas se indicó la curva de concentraciones dentro un rango superior a los 10 ppts; concentración mínima detectada por el ser humano.

Capítulo 4

Resultados y Análisis

Para dar cumplimiento con los objetivos evaluar el efecto del punto de aplicación de CAP sobre la calidad de agua y determinar la influencia de la concentración de CAP sobre la calidad de agua al final del tratamiento mediante los parámetros de control de operación, se tuvo en cuenta el diseño experimental analizando de manera conjunta los objetivos mencionados, así como la combinación del factor polímero (adición o no adición).

Según los resultados estadísticos arrojados por el análisis de varianza (*ver anexo 1 y 2*) los parámetros de conductividad y pH se descartan como parámetros de respuesta rápida para la medición de calidad en el agua, siendo analizados el color y la turbiedad. Se muestran los resultados cuantitativos de las características fisicoquímicas evaluadas color y turbiedad, como parámetros de calidad de operación para la tratabilidad del agua potable.

Sin Adición de Polímero

Turbiedad

La figura 1 representa los resultados obtenidos de la prueba de jarras para la remoción de una turbiedad inicial con un promedio de 25 UNT sin presencia de polímero. En el eje *X* se encuentran los diferentes puntos de aplicación del CAP junto con las variaciones de las dosis. En el eje *Y* se muestran los valores de la turbiedad remanente.

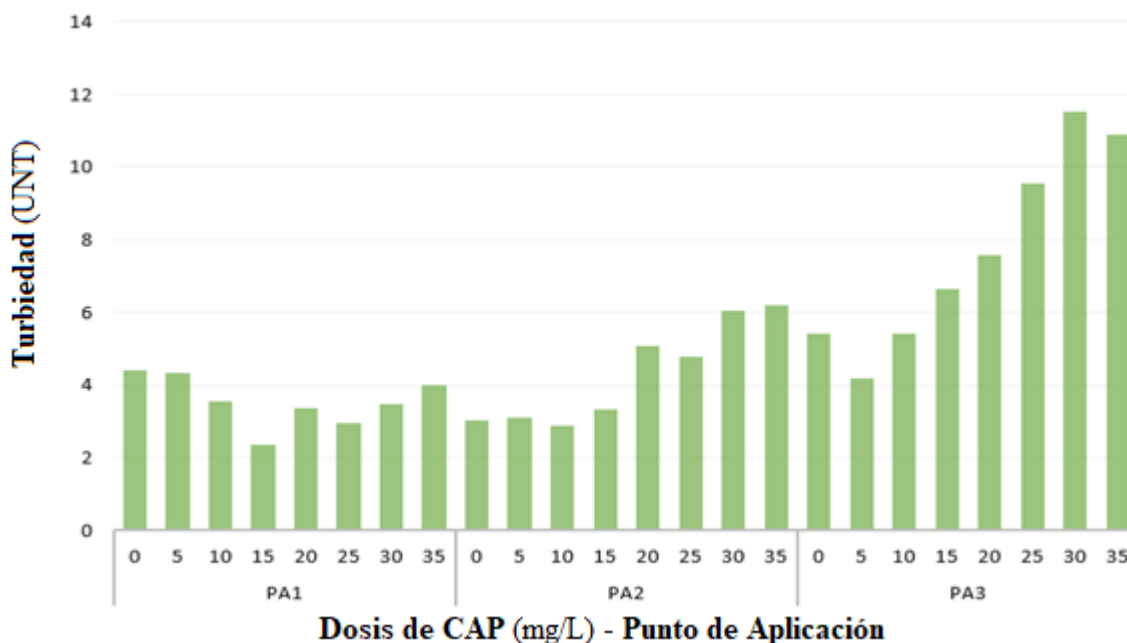


Figura 1. Resultados de la Característica Física Turbiedad sin Adición de Polímero. (Fuente: Autoras)

Turbiedad vs Punto de aplicación

El tiempo de acción del carbón con las partículas contaminantes en suspensión, se debe tener en cuenta a la hora de elegir el punto donde se desee aplicar el CAP; en el informe de subgerencia de producción ESVAL (2014) se menciona que el punto óptimo de aplicación se da cuando el flóculo se haya formado, de esta manera se disminuye la posible interferencia del carbón sobre el coagulante aplicado en el proceso. Es por esto que a mayor tiempo de contacto mayor será la eficiencia de remoción por adsorción, comprobando experimentalmente en figura 1, en donde los puntos **PA1** y **PA2** (presedimentación y coagulación), con tiempos de contacto de 47 y 37 minutos respectivamente obtuvieron resultados de turbiedad remanente por debajo del límite mínimo para continuar con el proceso de filtración.

El punto de aplicación denominado como **PA3**, evidencia una diferencia en los valores de la turbiedad remanente, se puede establecer una relación directamente proporcional entre la dosis aplicada y la calidad del agua. A mayor dosis menor calidad del parámetro turbiedad.

Estos resultados concuerdan con (Rocha, E. 2010) concluyendo que la efectividad del carbón se debe específicamente a la fase líquido sólido, el mayor tiempo de agitación tiene como consecuencia un mayor contacto entre las dos fases; por ende, permite que el área superficial del carbón activado y la distribución de sus poros retenga y elimine del agua compuestos principalmente orgánicos a causa de la afinidad y preferencia covalente del carbón por moléculas no iónicas y poco polares. Este proceso de remoción es posible gracias a las fuerzas de London, que son una de las clases de fuerzas de Van der Waals propias de la adsorción, siendo relativamente débiles y reversibles.

Se busca entonces que el CAP tenga el tiempo necesario para efectuar sus propiedades, manteniendo siempre un equilibrio de sus componentes sin provocar la ruptura por saturación de la molécula debido a los gradientes o tiempos excesivos de agitación; teniendo en cuenta lo anterior, el uso del carbón activado en solitario tiene la capacidad de remoción de partículas de contaminantes, sin afectar o tener consecuencias directas en la turbiedad como índice de calidad final del agua.

Turbiedad vs Dosis de CAP

Para el análisis de la dosificación de carbón activado, esta investigación abarcó ocho diferentes concentraciones que comprenden desde el nivel testigo (0 mg/L) hasta una concentración límite de 35 mg/L, siendo la última muy poco usada en las plantas de tratamiento de agua potable. Según literatura las dosis generalizadas de CAP empleadas en

las plantas de tratamiento de agua potable son de 5 mg/L, llegando en muy pocos casos a los 15 mg/L.

En la *figura 1*, se refleja una mejora en los resultados de la turbiedad en las dosis menores de CAP en los puntos **PA1** y **PA2**, dosis que se encuentran en un rango de 0 a 15 mg/L, y un aumento en la turbiedad remanente en **PA3** especialmente en la dosis de 30 mg/L, de esta manera se observa que a mayor concentración de CAP menor la calidad del agua. A pesar de la diferencia de turbiedad del punto **PA3**, se podrían considerar que los resultados en general son aceptados según los parámetros de calidad para los operadores de la planta, como dosis óptimas se presentan 5, 10 y 15 mg/L para ser adecuadas al tren de tratamiento, así como también se sugiere que sean considerados los puntos **PA1** y **PA2** para la adición del carbón activado, diferentes al punto de aplicación de la planta Bosconia dosificándose en esta al inicio de sedimentación cuando la etapa de floculación ha concluido.

La mejora en los resultados de dosis bajas se adjudica a la capacidad de adsorción, siendo esta la cantidad máxima de contaminante que el adsorbente (carbón) puede fijar y que se ve limitado por condiciones de temperatura, concentración y pH, en este caso la suma de las anteriores al ser adecuadas y la concentración de CAP estar en un rango de 5 mg/L a 15 mg/L se presume que las partículas de olor y sabor en concentración de grado 10 a 20 ng/L sean eliminadas sin afectaciones graves a la turbiedad remanente, resultados que serán comprobados más adelante.

Color

La *figura 2* demuestra los resultados obtenidos para el parámetro físico de color que presenta el agua en el momento de su recolección sin haber pasado por un filtro de 0.45 micras, llamado color aparente. El valor de color inicial arrojó un promedio de 31 UPC y un

valor promedio de la población de datos de color después de tratamiento de 25 UPC. En el eje X, las ocho dosis de carbón activado en polvo con sus correspondientes puntos de aplicación que generan los resultados de turbiedad en el eje Y.

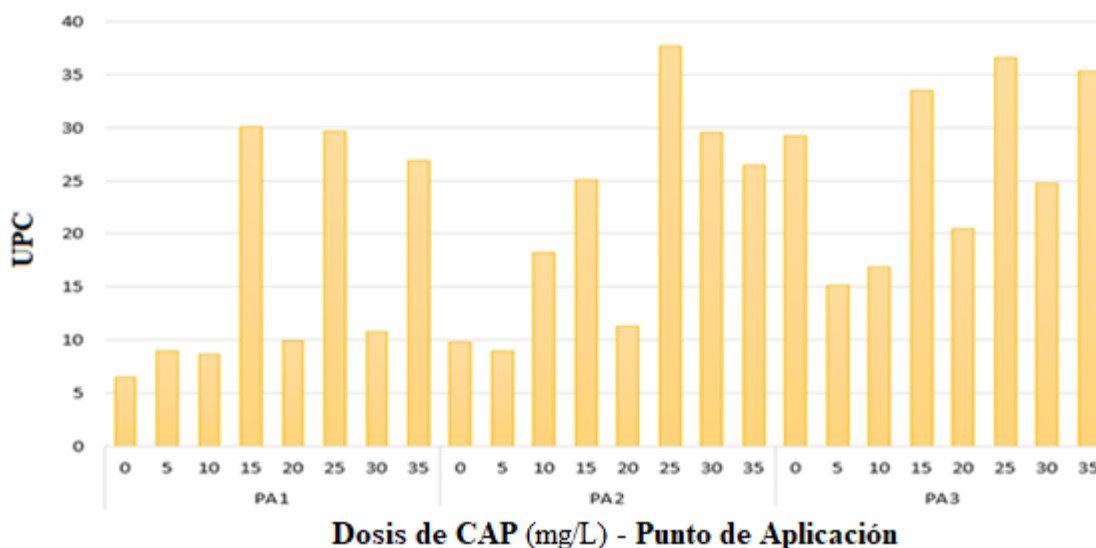


Figura 2. Resultados de medición de color sin adición de polímero. (Fuente: Autoras)

Color vs Punto de aplicación vs Dosis de CAP

De las cuatro características evaluadas, el color arroja los resultados menos favorables para la calidad final del agua. Según la resolución 2115 de 2007 de Colombia, el valor máximo permitido para el color aparente es de 15 UPC, límites que se sobrepasan en cada uno de los puntos de aplicación de CAP en el sistema de tratamiento.

El punto **PA1** como etapa primaria muestra los mejores resultados en cuanto a la cantidad de valores que se encuentran en lo permitido, cinco de las ocho dosis presentan valores positivos en un rango entre 5 a 10 UPC, con las dosis de 0, 5, 10, 20 y 30 mg/L. Para el punto **PA2**, las dosis 0, 5 y 20 mg/L logran los valores más favorables de color remanente con 10

UPC. Finalmente, el punto **PA3** con la dosis de 5 mg/L arroja el mejor valor de color con **15 UPC**; no obstante las dosis de 10 mg/L de los puntos **PA2** y **PA3** con un resultado de 18 y 16 UPC respectivamente, se podrían considerar como óptimas debido a que no se simula un proceso de filtración, de esta manera los resultados mencionados y en general todos los resultados de la característica mostrarían una mejora, ya que en la filtración las partículas restantes se adhieran por sí mismas al material de filtro.

La precipitación de las diferentes sustancias contaminantes ya sea en suspensión o disueltas, juega un papel importante en cuanto a la remoción de color. En las pruebas de jarras se pudo observar que en dosis mayores de CAP la precipitación no era tan efectiva, dejando en evidencia que el floc formado se tornaba de un color más oscuro al habitual (*Ver ilustración 8*).



Dosis de 35 mg/L de CAP sin polímero en PA3



Dosis de 5 mg/L de CAP sin polímero en PA3

Ilustración 8. Formación de floc sin presencia de polímero.

Fuente: autoras

Con Adición de Polímero

Turbiedad

En la *figura 3* se encuentran los resultados del comportamiento de la turbiedad con las mismas condiciones planteadas y un factor adicional que corresponde a la aplicación de 5mg/L de polímero. Se maneja un valor de turbiedad inicial promedio de 30,1. La población de estos datos tiene un promedio de 6,8 UNT para la turbiedad remanente. En el eje X se encuentran las diferentes dosis de CAP y los puntos en donde fueron aplicados y en el eje Y los valores de turbiedad resultado de la interacción de los anteriores mencionados.

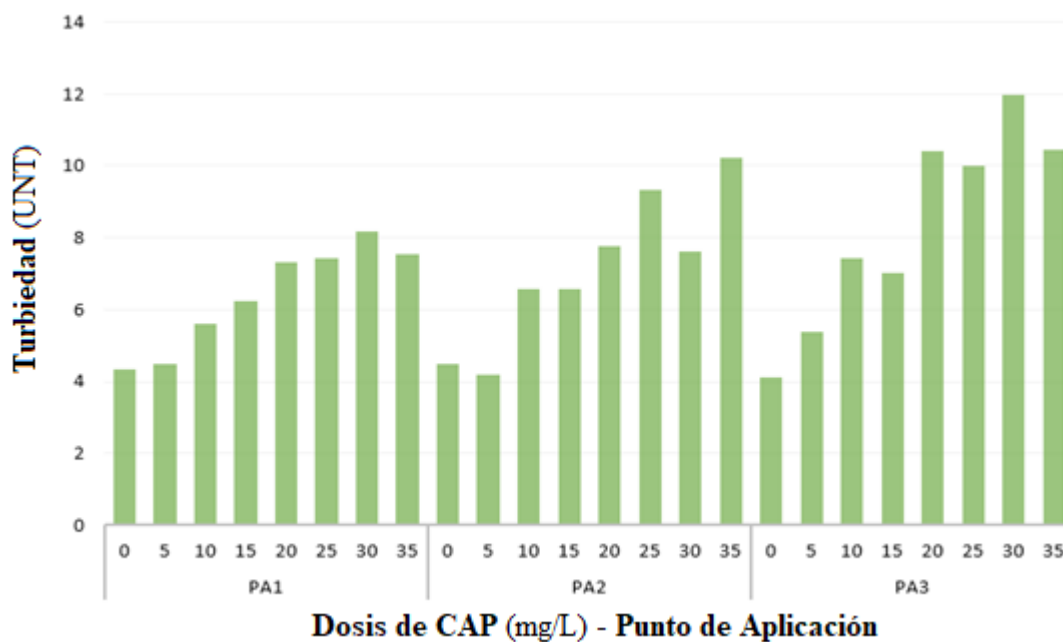


Figura 3. Resultados de la Característica Física Turbiedad con Adición de Polímero. (Fuente: Autoras)

Turbiedad vs Punto de aplicación

Se puede observar en la *figura 3*, que en general los puntos de aplicación evidencian buenas condiciones de calidad de agua en cuanto a la turbiedad remanente, encontrándose el valor más alto de esta en 12 UNT.

Al hablarse de la selección del mejor punto para aplicación de CAP, se podría considerar como el punto óptimo al **PA1**, cuyos resultados se encuentra en un rango de 4 a 8 UNT variando según la dosis aplicada. Seguido de la coagulación, estos dos puntos son considerados como de comportamiento similar en cuanto a sus resultados de turbiedad.

La varianza de valores entre los diferentes PA, se debe al momento en el que actúa el carbón activado, como se trata en el análisis anterior de turbiedad sin polímero, entre más alejada la dosificación de CAP del fin del tratamiento, mejores resultados de calidad y efectividad; es así como **PA1** al no tener interferencia con ninguna otra sustancia química muestra los mejores resultados, a diferencia de **PA2** y **PA3** con presencia y dosificación de coagulante y polímero. Esta interferencia se ve reflejada en la baja adsorción de las partículas contaminantes en suspensión.

Turbiedad vs Dosis de CAP

En cuanto a la dosis, *la figura 3* evidencia una tendencia de disminución de la calidad gradual a la dosis, es decir, a mayor dosis de CAP menor calidad del agua servida medida en turbiedad, existiendo la diferencia que al ser añadido el polímero los resultados de turbiedad remanente muestran una variabilidad con respecto a los valores sin polímero.

Los mejores resultados coinciden en una dosis de 5 mg/L en cualquier PA, con un valor de 4 UNT, los valores menos óptimos se encontraron con 30 mg/L (8 UNT) para el punto **PA1** y **PA3**, y con 35 mg/L para el punto **PA3** con valor de 12 UNT.

A raíz de estos resultados se puede inferir que de la misma manera en la que es necesario determinar una dosis óptima para coagulante y polímero, también se debe disponer de un análisis de dosis óptima de CAP, ya que el exceso de este y la presencia de otras sustancias

químicas tendrá como resultado una aglomeración de floc que no se sedimenta debido a que su peso no es el adecuado y por ende la gravedad no tendrá efecto sobre este.

Color

La *figura 4* muestra los resultados del comportamiento del color aparente (eje Y) según las dosis y las variaciones del punto de aplicación (eje X). El promedio del color para la población de los datos caracterizados es de 43 UPC. (Ver anexo 2) Se parte con un valor inicial promedio de la característica de color de 36 UPC.

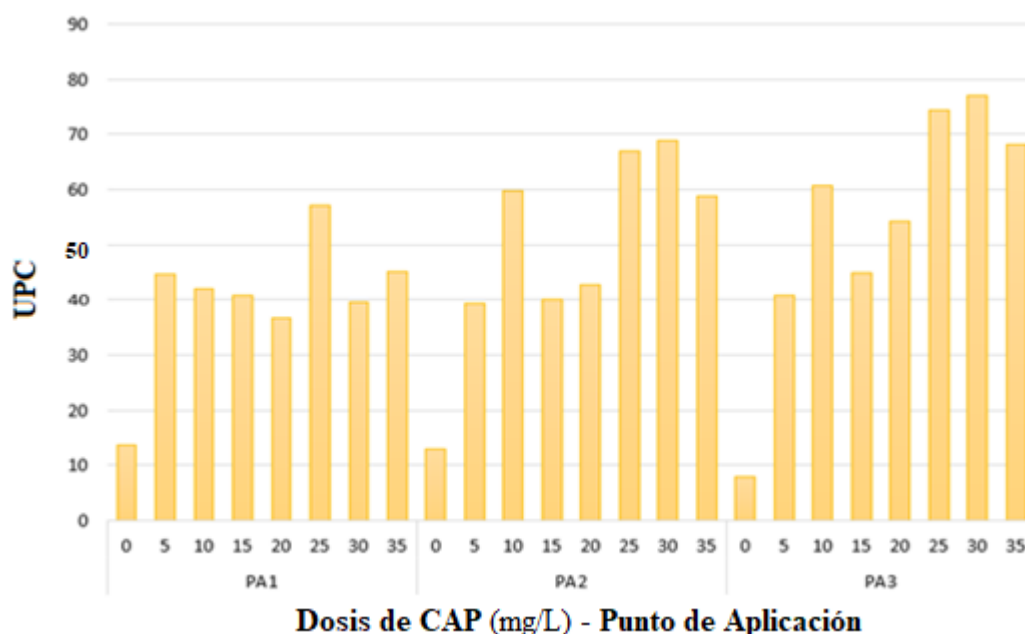


Figura 4. Resultados de Color vs dosis de CAP con Aplicación de Polímero (Fuente: Autoras).

Color vs Punto de aplicación vs Dosis de CAP

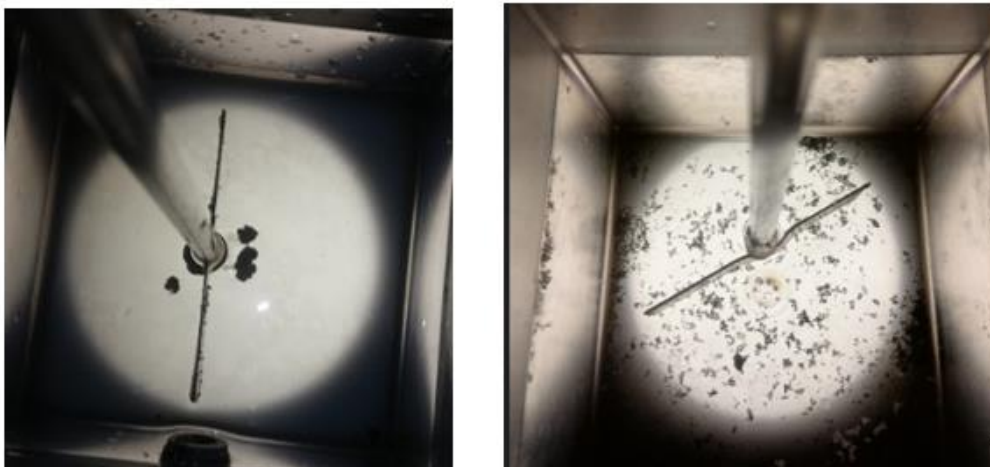
El comportamiento de la característica de color no es tan conveniente en cuanto a sus resultados, reincidiendo con lo analizado anteriormente sin adición de polímero (Ver figura 4). Estos valores sobrepasan hasta 3 veces el valor límite permitido para control de un sistema

de tratamiento en cuanto a esta característica física. Siendo el punto **PA1** nuevamente el de mejores resultados en comparación a los puntos consecutivos.

Se genera una tendencia similar al primer análisis de color donde a mayor dosis menor calidad y mayor color. Las diferentes dosis de **PA1** evidenciaron valores de color en rango de 13 a 50 UPC. Los puntos **PA2** y **PA3**, con los resultados más altos en un rango de 9 a 77 UPC siendo el último el valor más alto para esta característica.

El rendimiento de la dosis testigo (0 mg/L) en cada uno de los puntos de aplicación mostró los valores óptimos de color con 8 UPC (**PA3**) y 11 UPC (**PA1** y **PA2**). La adición de CAP influye en los resultados de color en cada simulación del proceso operativo sin importar la variación de las dosis que fueron usadas.

En la *ilustración 9* se muestra la comparación entre dos dosis que generan diferencias físicas en las partículas en suspensión. Para la dosis de 10 mg/L de CAP con un color de 59 UPC en **PA2**, el floc indica estar compactado en la solución sin promover una sedimentación adecuada. Seguido de la dosis de CAP de 30 mg/L con un color 69 UPC en **PA2**, el CAP dosificado se encuentra en suspensión y sin una correcta formación de floc que no logra ser sedimentado.



Dosis de 10mg/L de CAP con polímero en PA2 Dosis de 30 mg/L de CAP con polímero en PA2

Ilustración 9. Formación de floc con presencia de polímero.

Fuente: autoras

Comparación de Resultados CP y SP

A continuación (Ver tabla 4), por medio de una síntesis de los resultados se contemplan las mejores óptimas condiciones de calidad según la adición o no adición de polímero, variables de respuesta color y turbiedad, mejor PA y dosis de CAP.

Tabla 4. Resultados de las mejores condiciones de calidad

MEJORES CONDICIONES DE CALIDAD				
	SP		CP	
	PA	Valor obtenido	PA	Valor obtenido
Turbiedad	Presedimentación	2 UNT	Presedimentación	4 UNT
	15 mg/L		10 mg/L	
Color	Presedimentación 5 mg/L	9 UPC	Todos los PA	12 UPC
			0 mg/L	
			Presedimentación 20 mg/L	38 UPC

Fuente: Autoras

Como se mencionó con anterioridad la presedimentación es el punto de aplicación con comportamientos óptimos según los resultados. La condición *SP* (sin adición de polímero) con una dosis de 15mg/L de CAP generó un valor de 2 UNT para la muestra de agua. Para la adición de polímero (CP) hay coincidencia en el punto, pero la dosis difiere a 5mg/L con un valor de turbiedad de 4 UNT.

El parámetro color *SP* reincide en que el mejor comportamiento se dio con una dosis de 5mg/L de CAP en la presedimentación con un valor de 9 UPC. Para la adición de polímero se tomaron dos resultados de interés, la no aplicación de CAP (0mg/L) que generó buenas condiciones de calidad para todos los puntos de aplicación con un valor de 12 UPC para cada uno. La segunda mejor condición de calidad de agua se obtuvo con una dosis de 20mg/L de CAP para el punto presedimentación.

Determinación de GSM y MIB

El análisis cromatográfico arrojó los resultados cuantitativos de GSM y MIB (*ver figura 5 y 6*), con niveles mínimos de cuantificación de 5 ng/L y con un tiempo de retención mínimo de 8,92 para Geosmina y 6,73 para MIB. En las muestras analizadas el MIB tuvo una concentración menor a los 5 ng/L, siendo descartado su análisis al no cumplir con el nivel mínimo de percepción en los humanos. La GSM se cuantificó con un valor inicial de 231 ng/L.

En el eje *X* se grafican los puntos de aplicación empleados en el proyecto, con dosis de (0, 2, 5, 10) mg/L de CAP. En el eje *Y* la concentración de Geosmina (ng/L) encontrada en las muestras analizadas.

Con Polímero

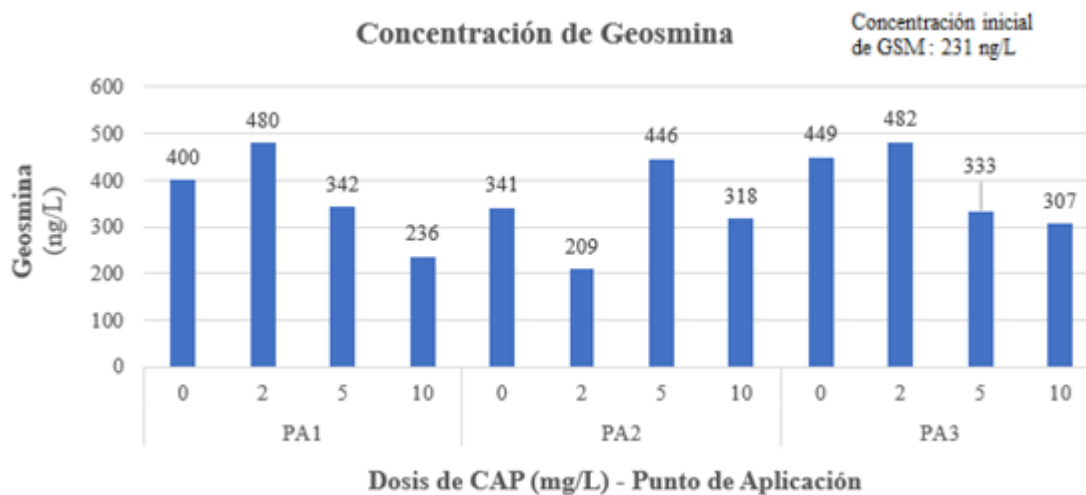


Figura 5. Resultados concentración de GSM con Aplicación de Polímero (Fuente: Autoras).

Sin polímero

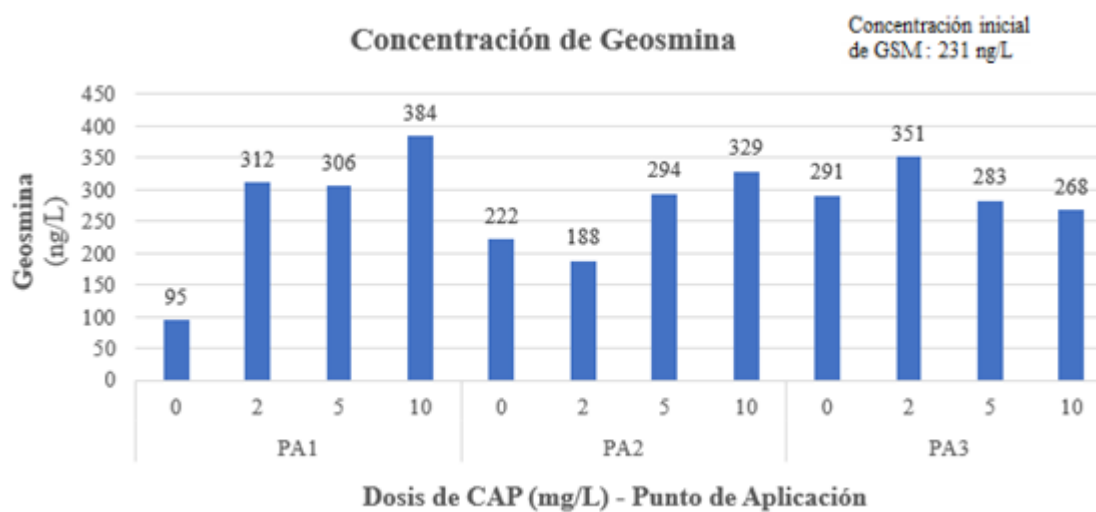


Figura 6. Resultados concentración de GSM sin Aplicación de Polímero (Fuente: Autoras).

La persistencia de la GSM fue evidente en los resultados (*ver figura 5*) por sus altas concentraciones en cada condición simulada en la prueba de jarras. Al analizar el punto de aplicación, no se evidencia una buena tendencia de remoción de la concentración inicial de GSM, de esta manera no se puede definir un comportamiento que ayude en el proceso operativo tanto del PA como de la presencia del ayudante de coagulación.

Se observa que la variación de las concentraciones de CAP genera una alteración en las concentraciones de GSM. La dosis de CAP de 2 mg/L en el PA2 arrojó el valor más bajo y con remoción de esa condición inicial de 231 ng/L, como resultado esta dosis logró una concentración de 209 ng/L con la aplicación de polímero; indicando una posible adsorción de olor y sabor en la muestra.

Al evaluar la efectividad de remoción de GSM y dado los resultados, se considera indicar que no existió una tendencia eficaz de remoción, de esta manera no se pudo evidenciar con gran exactitud la dosis y punto de aplicación óptimo para un posible tratamiento o puesta en marcha en el sistema de operación de la planta Bosconia.

Con un valor inicial de la Geosmina en la muestra sin tratamiento de 231 ng/L, se obtuvieron resultados no tan favorables para la remoción de este metabolito (*ver figura 6*). Como mejor resultado se encontró al punto PA1, con 0 mg/L de CAP para una concentración de GSM de 95 ng/L.

Aun cuando no se puede observar una clara tendencia de remoción, se destaca la no presencia de CAP con los valores más bajos comparados con las demás dosis, el punto **PA2**, cuenta con dos resultados por debajo del valor inicial de concentración, la dosis 0 mg/L con 222 ng/L y la dosis 2 mg/L con 188 ng/L. En los puntos **PA1** y **PA2** se encontraron los valores

más altos de este metabolito con 384 y 329 ng/L, sobrepasando por casi 100 unidades al valor inicial.

Los resultados no muestran una clara relación entre la remoción, las dosis y los puntos de aplicación, pero comparado con los resultados cuando se aplica polímero, se podría sugerir que el uso de este ayudante de coagulación no mejora las condiciones de calidad ni genera un proceso de remoción adecuado para este problema de olor y sabor, de la misma manera se sugieren las dosis bajas de CAP, ya que muestran los mejores resultados para remoción de Geosmina.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

- De los parámetros fisicoquímicos evaluados en las pruebas de jarras, la conductividad y pH no mostraron una varianza significativa después del tratamiento en relación con las condiciones iniciales de las muestras, descartando estos parámetros como evaluación para la calidad del agua.
- El punto de aplicación *presedimentación* presenta los resultados óptimos para el proceso operativo de la planta, se concluye que este factor influye en los resultados de los parámetros de calidad del agua. El punto de aplicación más lejano del final del tren de tratamiento generó las condiciones químicas adecuadas para el funcionamiento del carbón activado, ampliando su tiempo de acción y con la adecuada adsorción de partículas en suspensión sin interferencia de otras sustancias químicas empleadas en el proceso de potabilización.
- El comportamiento de la dosis establece una influencia directa sobre la calidad de agua; a mayor concentración (dosis >20 mg/L) de carbón activado en polvo, menor es la calidad del agua, tendencia que se comparte en las dos condiciones CP y SP. De esta manera una dosificación de carbón activado en rango de 5 mg/L a 15 mg/L garantiza la adecuada adsorción de los coloides presentes en el agua.
- Los resultados por cromatografía, determinan que la dosificación del MIB no presentó valores detectables por equipo generando una curva de resultados menores a 5ng/L. En cuanto a la GSM no hay una relación directa evidente entre la remoción óptima de GSM y el PA, pero se destaca que la presencia del polímero y la variabilidad de las dosis de

CAP influyen en la concentración y remoción de GSM. Como punto óptimo de aplicación se encontró a la presedimentación junto con dosis bajas (< 2 mg/L) de CAP sin aplicación de polímero.

Recomendaciones

En las corridas simuladas a escala laboratorio para cada bloque, la adición de polímero se realizó en fase líquida. El proceso de mezcla se realizó con un volumen de agua a altas temperaturas con el objetivo de lograr una mezcla uniforme. Se recomienda a la planta de tratamiento de Bosconia emplear el mismo procedimiento de mezcla para evitar dosificaciones altas e innecesarias de este producto químico.

La filtración es un proceso operativo de gran importancia en una planta de tratamiento, estudiar los resultados después de esta etapa influencia en los resultados obtenidos, por esto se recomienda el uso de filtros en los bloques de cada ensayo realizado en este estudio.

Bibliografía

- Acueducto Metropolitano de Bga. (2012). *Acueducto Metropolitano de Bucaramanga*.
Obtenido de AMB: <http://www.amb.com.co:8081/inicio/>
- Aguas & Aguas de Pereira. (13 de agosto de 2014). *IRCA, definición, análisis e interpretación*. Recuperado de
<https://www.aguasyaguas.com.co/calidad.aguasyaguas.com.co/index.php/es/home-es-es/10-contenido/10-irca-definicion-analisis-e-interpretacion>
- Aguilera Castro, A. (2014). *Sistema de abatimiento de olor planta de tratamiento de agua potable Concón-Esval*. Chile: Pontificia Universidad Católica De Valparaíso.
- Arreola Martínez, M. (2015). *Uso de polímeros en el tratamiento de agua para consumo humano*. Ciudad Universitaria, México, D.F., 2015.
- Bedoya, D. C., & Giraldo, M. D. (2012). *Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana*. Pereira: Universidad Tecnológica De Pereira.
- Brito, N. V. (2007). *Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad de México*. México D.F: ESIA.
- Bueno Zabala, K., Torres Lozada, P., & Delgado, L. G. (2014). *Monitoreo y medición del ajuste del pH del agua tratada del río cauca mediante índices de estabilización*. Cali: Scielo.

- Camacho, N. C. (23 de mayo de 2011). *Tratamiento de agua para consumo humano*. Recuperado de https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/viewFile/232/208
- Cárdenas, Y. A. (2000). *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. Lima: SEDAPAL.
- Correa, J. E. (2016). *Evaluación de la aplicación de carbón activado granular en la filtración del r en la filtración*. [ilustración]. Santiago de Cali: Universidad Del Valle.
- Corrales, M., Villalobos, K., Rodríguez, A., Muñoz, N., & Umaña, R. (2017). *Identificación y caracterización molecular de cianobacterias tropicales de los géneros Nostoc, Calothrix, Tolypothrix y Scytonema (Nostocales: Nostocaceae), con posible potencial biotecnológico*. Univ. Estatal a Distancia Costa Rica, 9(2), 280-8.
- Decantadores - GEDAR - *Tratamiento de Aguas*. [Ilustración]. (s.f.). Recuperado de <https://www.gedar.com/residuales/decantadores.htm>
- Ebeling, J., Rishel, K., & Sibrell, P. (2004). *Greening and evaluation of polymers as flocculation aids for the treatment of aqua cultural effluents*. USA: ELSEVIER.
- Flórez, J. M. (2010). *Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio*. Medellín: DYNA.
- Gómez, G. I. (1995). *Manual de Análisis de aguas*. Manizales: Universidad Nacional De Colombia- Sede Manizales.

- Herrera, E. (2018). *Evaluación de concentraciones de carbón activado para la eliminación de generadores de sabor en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, Santander*. Universidad Pontificia Bolivariana- Sede Bucaramanga.
- Hilleboe, H. (2007). *Manual de tratamiento de aguas*. México: LIMUSA.
- Hilleboe, H. E. (1995). *Manual de tratamiento de aguas*. México: Limusa.
- Hu, H., & Hong, Y. (2008). *Algal-bloom control by allelopathy of aquatic macrophytes—a review*. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2(4), 421-438.
- Marcó, L., Azario, R., Metzeler, C., & Garcia, M. d. (2004). *La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay*. Argentina: Higiene y Sanidad Ambiental.
- Ministerio de la Protección Social. (2007). *Decreto número 1575 de 2007*. Bogotá.
- Otaño, S., Román, N., & Bogarín, C. (2017). *Cianobacterias productoras de 2-metilisoborneol en Corrientes (Argentina)*. *Biología Acuática*, (32), 16-24.
- Paerl, H. (2014). *Mitigating harmful cyanobacterial blooms in a human-and climatically impacted world*. *Life*, 4(4), 988-1012.
- Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2013). *Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls*. *Microbial ecology*, 65(4), 995-1010.
- Puentes, N. A. (2005). *Remoción de materia orgánica por coagulación-floculación*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia- Sede Manizales.

- Rajasekhar, P., Fan, L., Nguyen, T., & Roddick, F. A. (2012). *Impact of sonication at 20 kHz on Microcystis aeruginosa, Anabaena circinalis and Chlorella sp.* Water research, 46(5), 1473-1481.
- Rocha, E. (2010). *Ingeniería de tratamiento y acondicionamiento de aguas*. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Sarmiento, M. M. (8 de agosto de 2015). *Problemática ambiental y determinación cromatográfica de Geosmina y MIB*. Obtenido de AGQ Labs Chile.
- Subgerencia de Producción. (2014). *Justificación del uso y dosis de carbón activado en plantas de agua potable ESVAL S.A.* recuperado de:
<http://infota.siss.cl/concesiones/empresas/ESVAL/>
- TAR. (2010). *Manual del carbón activo*. Sevilla: Academia. Recuperado de
<http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- Toro, C. G. (octubre de 2011). *Monitoreo de la calidad del agua*. Recuperado de
<http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-859/maguaturbidez.pdf>
- Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pachecho, S., & Herrera, O. F. (2014). *Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano*. Manizales: Universidad Católica de Manizales.
- Valero, M. C., & Cruz, L. E. (1999). *Remoción de sustancias húmicas por coagulación con alumbre*. Bogotá: Universidad nacional de Colombia.

Varian. (22 de mayo de 2010). *Análisis de Geosmina y 2-Metilsoborneol*. [ilustración].

Recuperado de <http://avibert.blogspot.com/2010/05/analisis-de-geosmina-y-2.html>

Zamora, R. M. R., & Pilotzi, A. D. *Remoción de Olor y Sabor de Aguas Naturales*

Causados por Endotoxinas: Caso del 2-Metilisoborneol (MIB).

Anexo 1

Parámetros Medidos en Campo

Conductividad

Sin polímero

Se presentan los resultados de la conductividad y su comportamiento frente a la dosis de CAP y el punto de aplicación.

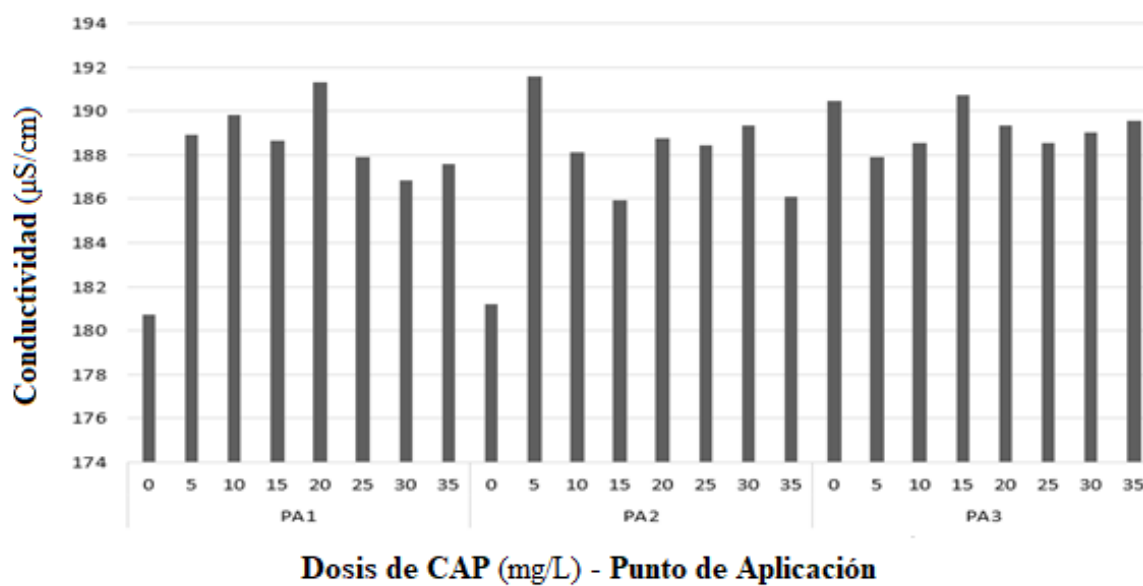


Figura 7. Resultados de dosis vs conductividad sin Aplicación de Polímero (Fuente: Autoras).

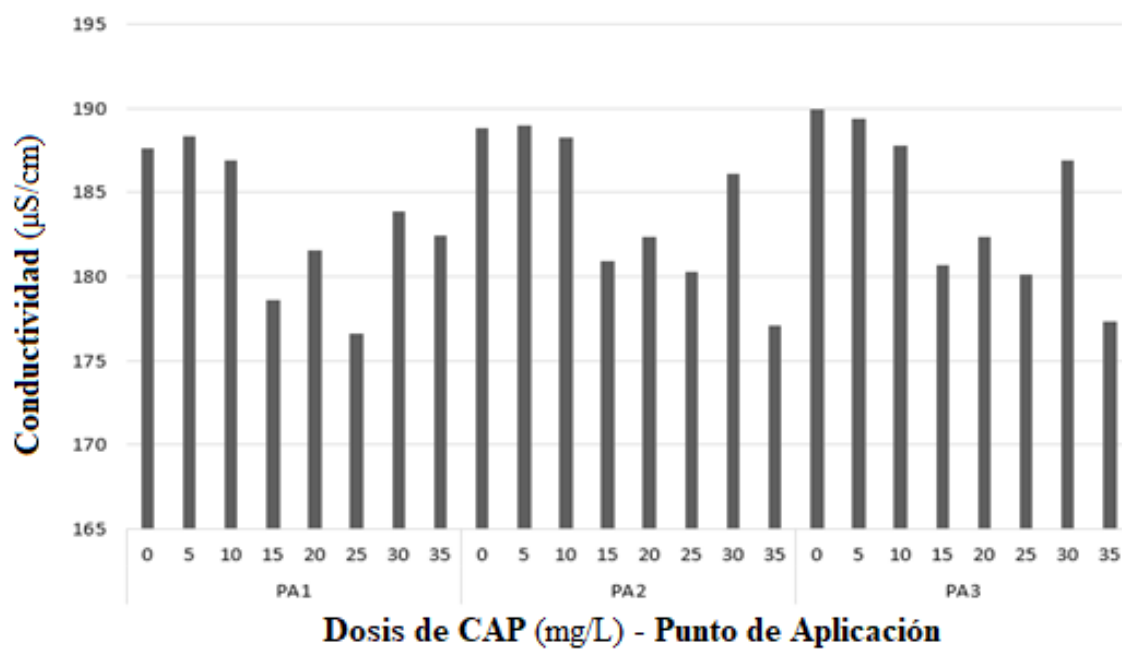
Con polímero

Figura 8. Resultados de dosis vs conductividad con Aplicación de Polímero (Fuente: Autoras).

pH

Sin polímero

Se muestran los resultados de la característica fisicoquímica pH y su comportamiento frente a la dosis de CAP y el punto de aplicación.

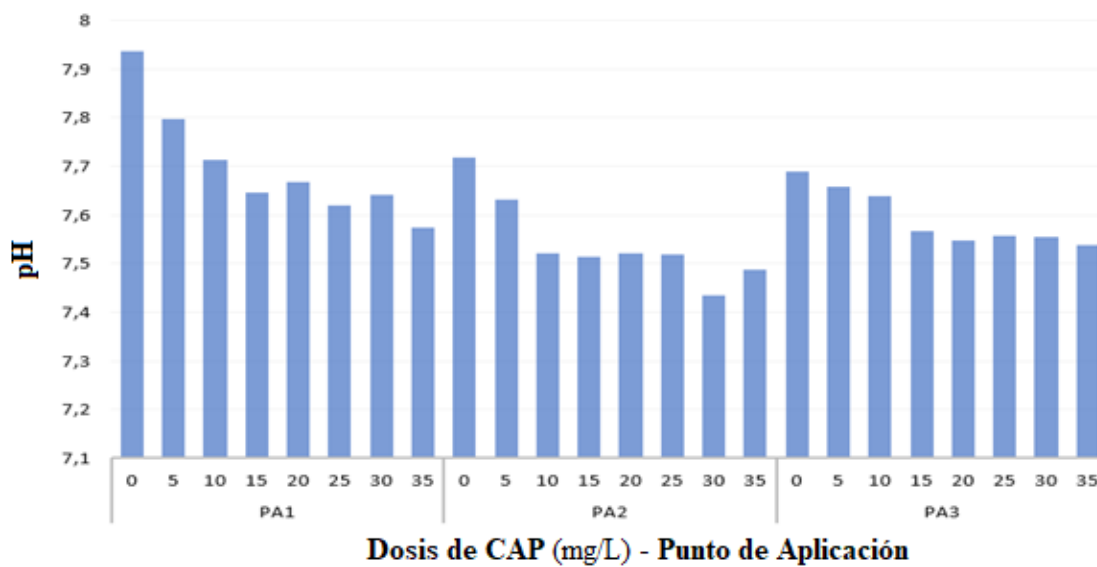


Figura 9. Resultados de dosis vs pH sin Aplicación de Polímero (Fuente: Autoras).

Con polímero

Se muestran los resultados de la característica fisicoquímica pH y su comportamiento frente a la dosis de CAP y el punto de aplicación.

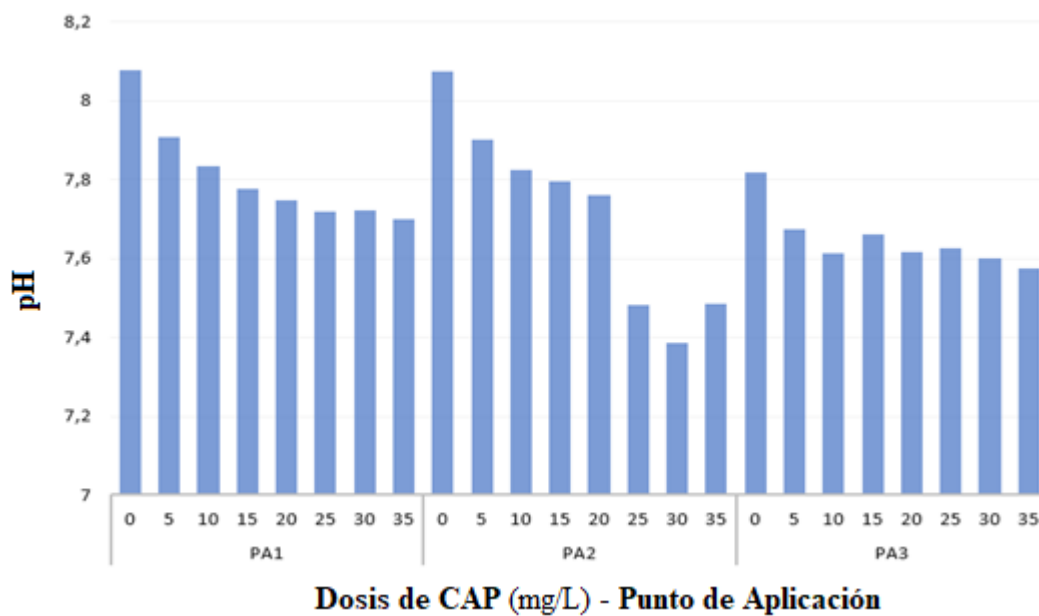


Figura 10. Resultados de dosis vs pH con Aplicación de Polímero (Fuente: Autoras)

Anexo 2

Análisis de Varianza

Tabla 5. Análisis estadístico de varianza

Hipótesis	¿El promedio de SP es igual o diferente de CP?	¿El promedio del factor es igual o diferente con los demás puntos?	¿En cuales pares del PA es diferente el promedio de cada factor?
Prueba estadística	Prueba T para la igualdad de medias	Distribución F	Scheffe
pH	Diferente	Diferente	PA1-PA2
Conductividad	Diferente	Es igual en todos los puntos	No hay diferencia
Turbiedad	Diferente	Diferente	PA1-PA3, PA2-PA3 (No hay diferencia entre PA2-PA1)
Color	Diferente	Diferente	PA1-PA3

Nota: (Fuente Autoras)

Tabla 6. Comparación de las medias de CP y SP divididos por PA

PA	Factores	Media	
		CP	SP
PA1	pH	7,7684	7,6783
	Conductividad	184,6453	187,7969
	Turbiedad	5,15	3,38
	Color	32,125	21,094
PA2	pH	7,7497	7,5091
	Conductividad	184,6234	187,6766
	Turbiedad	5,88	3,96
	Color	40,828	22,531
PA3	pH	7,7267	7,5609
	Conductividad	187,8189	189,6203
	Turbiedad	9,56	7,47
	Color	56,547	30,856

Nota: (Fuente Autoras)

Tabla 7. Comparación de las medias de CP y SP divididos por dosis

Dosis (mg/L)	Factores	Media	
		CP	SP
0	pH	7,995	7,7738
	Conductividad	190	183,6
	Turbiedad	2,67	4,31
	Color	10,66	14,8
5	pH	7,82	6,65
	Conductividad	190	189,6
	Turbiedad	3,35	3,6
	Color	34,66	12,12
10	pH	7,7	7,5
	Conductividad	188	188
	Turbiedad	6,36	3,74
	Color	48,4	15,7
15	pH	7,7	7,5
	Conductividad	182	188
	Turbiedad	6,45	4,02
	Color	40	32,8
20	pH	7,6	7,5
	Conductividad	183	191
	Turbiedad	8,47	5,2
	Color	46,4	15,5
25	pH	7,6	7,5
	Conductividad	181	188
	Turbiedad	8,48	5,4
	Color	52,2	35,1
30	pH	7,6	7,5
	Conductividad	181	188
	Turbiedad	8,48	5,4
	Color	55	39
35	pH	7,6	7,5
	Conductividad	186	188
	Turbiedad	9,15	6,68
	Color	56,9	39

Nota: (Fuente Autoras)