



**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA
DR. "ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

Análisis de las causas que provocan el sobreconsumo de sulfato de aluminio en la Planta Potabilizadora de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

ADRIANA HARMANT OROCENO

Moa 2019



**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA
DR. "ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

Análisis de las causas que provocan el sobreconsumo de sulfato de aluminio en la Planta Potabilizadora de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Autora: Adriana HarmantOroceno

Tutoras: Dra. Mercedes Sosa Martínez

Ing. YannelisFavier Trueba

Consultante: M.Sc Marcos Medina Arce

Moa-2019

Declaración de autoridad

Yo: Adriana Harmant Oroceno

Autora de este trabajo de diploma, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido presentado para ningún grado de calificación profesional y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en el mismo documento.

A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", según lo establecido para hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Adriana Harmant Oroceno

Dra. Mercedes Sosa Martínez

Ing. Yannelis Favier Trueba

Pensamiento

“¡Cuán hermosa generación la de los jóvenes activos.¡”

José Martí

Dedicatoria

A mis padres YurainisOroceno Toirac y Roberto Carlos Harmant Gutiérrez, por creer siempre en mí, y por brindarme todo el amor del mundo y darme una buena educación.

A todos mis seres queridos.

Agradecimiento

Le doy gracias a Dios primeramente por darme la vida, los conocimientos y el entendimiento necesario para cumplir mis metas.

Agradezco a todas las personas que de una forma u otra contribuyeron a realizar el presente trabajo y a realizarme como persona.

- ✓ Especial agradecimiento a mi madre YurainisOroceno Toirac y mi padre Roberto Carlos Harmant Gutiérrez por el apoyo incondicional en todo momento.
- ✓ A mis tutores la Dra. Mercedes Sosa Martínez, a la Ing. YannelisFavier Trueba.
- ✓ A mi abuela Juana Toirac Azahares, a mi tía YericelOroceno y a mis hermanos Arianna, Carmen, Dalila y Robertico.
- ✓ A toda mi familia en general.
- ✓ A Kirenia Silva Urrutia y Dayana Ramírez Silva por apoyarme siempre en todo y por estar siempre a mi lado, a las cuales quiero como si fueran de mi familia.
- ✓ A mi novio Luis Dos Santos Vunge, por su apoyo, dedicación y por enseñarme que siempre se puede lograr lo que uno desea. A su familia que siempre están pendiente de mí.
- ✓ A mis amigos, en especial a MarlisGuilian, Beatriz Peña, Roxanna De Castro, Antonio Chivango y Hortencio Lopes.
- ✓ Al claustro de profesores del ISMM, porque todos de forma general han contribuido en mi formación, en especial a la Dra. MadayCartaya Pirey y M.Sc. Marcos Medina Arce, a todos los profesores del Departamento de Metalurgia, en especial al Dr. Amaury De Los Milagros Palacios y la Ing. Lorelis Milian Luperón.

- ✓ Al colectivo de trabajadores de la Planta Potabilizadora UBS Recepción y Suministro, que hicieron agradable mi estancia en el período de investigación.
- ✓ A todos mis amigos y compañeros, gracias por su ayuda y comprensión en los momentos precisos.
- ✓ Agradezco a todas las personas que conozco, con las que comparto momentos de risas y momentos de llanto, gracias por permitirme formar una gran familia.

A todos, MUCHAS GRACIAS.

Resumen

La presente investigación tiene como propósito analizar las causas que provocan el sobreconsumo de sulfato de aluminio y el comportamiento de los parámetros de entrada y salida del proceso de potabilización del agua de la UBS Recepción y Suministro de la Empresa Ernesto Che Guevara en los años 2017 y 2018, el cual se realizó mediante métodos matemáticos-estadísticos de correlación y regresión, como el método de regresión paso a paso hacia atrás donde se determinó que las variables significativas para el proceso son la turbidez y los sólidos totales disueltos, obteniendo como resultado un modelo matemático en función del consumo de sulfato de aluminio con estos parámetros:

$$\text{Consumo}_{Al_2(SO_4)_3} = 41,93 + 0,056 \cdot \text{Turbidez} - 0,283 \cdot \text{STD}$$

Mediante el cual se determinó la dosis óptima media para diferentes rangos de turbidez, manteniendo una regularidad como el comportamiento real. Se realizó la prueba de hipótesis sobre las medias mensuales del agua cruda y potable como muestras pareadas y se determinó que el consumo de sulfato de aluminio empleado mejora las propiedades de la misma, siendo así para el color y turbidez que presentaron un comportamiento adecuado y no para los sólidos totales disueltos los cuales se incrementan, aunque cumplen la norma de agua potable. Se determinaron las posibles causas que afectan el proceso y las medidas para mejorar la eficiencia del mismo. Además, en el año 2018 hubo un sobreconsumo de sulfato de aluminio de 23,66 toneladas generando gastos de 8 895,4 CUC.

Palabras clave: parámetros del agua, sulfato de aluminio, potabilización, correlación, regresión.

Abstract

The present project aims to analyze the causes that provoke the consumption of aluminum sulfate and to examine the behavior of the input-output parameters of the water process of potabilization at the Ernesto Che Guevara company's UBS "Reception and Supply" in 2017 and 2018, which was carried out by means of mathematical statistical methods of correlation and regression, such as step by step backward regression where it was determined that the significant variables for the process are the turbidity and the solid dissolved totals, getting as a result a mathematical model in terms of the consumption of sulfate of aluminum with these parameters:

$$\text{Consumo}_{Al_2(SO_4)_3} = 41,93 + 0,056 \cdot \text{Turbidez} - 0,283 \cdot \text{STD}$$

It was done the hypothesis testing on the monthly averages of raw and drinking water as paired samples to determine that the quantity of consumption of sulfate of aluminum used improves water properties. It is shown that the color and turbidity presented an ideal behavior, but the dissolved solid totals were increased, which is detrimental for the process although they are drinkable water norm. It was determined the possible causes that provoke the reactant overconsumption and the measures to improve the process efficiency. Besides, there was an overconsumption of 23.66 tons of aluminum sulfate in 2018 generating expenses of 8 895.4 CUC.

Key words: parameters of water, aluminum sulfate, potabilization, correlation, regression.

ÍNDICE	Pág
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes de la investigación.....	4
1.2. DESCRIPCIÓN DE PROCESOS DE TRATAMIENTO	10
1.2.1 Proceso de Coagulación-Floculación.....	10
1.2.2.Floculadores-clarificadores	13
1.2.3. Sedimentación	14
1.2.4. Filtración	15
1.2.5. Desinfección.....	17
1.3. Descripción del flujo tecnológico del proceso de potabilización	19
1.4. Características físicas-químicas del agua	22
1.4.1. Color	22
1.4.2. Turbidez	22
1.4.3. pH.....	23
1.4.4. Alcalinidad.....	24
1.4.5. Dureza Cálcica y Magnésica	24
1.4.6. Sólidos totales disueltos.....	24
1.4.7. Cloro	25
1.4.8. Materia orgánica	25
1.4.9. Conductividad	26
1.4.10. Temperatura	26
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
2.1 Reactivos, materiales y equipos empleados en la investigación	28
2.2. Características principales de las materias primas.....	29
2.2.1. Características físico-químicas del agua cruda y potable	29
2.2.2. Sistema de preparación de los reactivos	30
2.2.3. Cálculo de las dosis de sulfato de aluminio	33
2.3 Metodología de experimentación.....	33
2.4. Metodología estadística	38
2.4.1 Prueba de hipótesis sobre las medias de dos distribuciones con muestras pareadas	39

2.4.2. Correlación y regresión	40
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
3.1 Análisis de las características físico-químicas del agua en relación con el consumo de sulfato de aluminio	42
3.2. Análisis estadístico de los resultados experimentales	44
3.2.1. Comportamiento de los parámetros del agua en relación con el consumo de sulfato de aluminio	45
3.2.2. Método de regresión paso a paso hacia atrás	49
3.2.3. Obtención del modelo matemático- estadístico.....	52
3.2.4 Prueba de hipótesis sobre la media de muestras pareadas	55
3.3. Normativa de los parámetros de salida del agua y consumo de sulfato de aluminio	58
3.4. Posibles causas que provocan el incremento del índice de consumo del sulfato de aluminio.	61
3.5. Medidas para mejorar la eficiencia del proceso de potabilización	61
3.6. Valoración económica	63
3.7. Protección al hombre y al medio ambiente	66
CONCLUSIONES.....	68
RECOMENDACIONES	70
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	71
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

El suministro de agua potable es un problema que ha ocupado al hombre desde la Antigüedad. En la actualidad, y gracias a la Resolución de Naciones Unidas, todos los Estados y organizaciones internacionales deben trabajar para propiciar recursos financieros y el uso de tecnología que ayude a los países en vías de desarrollo a conseguir un suministro de agua potable y saneamiento saludable, limpio, accesible y asequible para todos.

La planta potabilizadora de agua situada en la carretera de la Mina Pedro Soto Alba a cinco km del poblado de Moa, tiene como objetivo fundamental el abastecimiento de agua a la Empresa Ernesto Che Guevara para lo cual fue diseñada, actualmente abastece en parte la población del municipio y otras entidades. La planta fue diseñada para producir 50 000 m³ de agua, en estos momentos tiene una capacidad de 67 000 m³ con posibilidad de seguir aumentando su producción, gracias a la introducción de algunas técnicas. Mediante un proceso de coagulación–floculación, filtración y desinfección, convierte el agua cruda del río Moa en potable con la calidad requerida para el consumo humano e industrial. El proceso de tratamiento se realiza por varias etapas fundamentales como son: estación de bombeo, cámara de distribución, bloque de tratamiento, tanques de almacenaje y las conductoras de agua(Manual, 2016).

Desde diciembre del 2017 hasta la actualidad se observa la presencia de una alta concentración de sólidos en suspensión en el canal mezclador de la Planta Potabilizadora, lo cual impide la ocurrencia adecuada del proceso de potabilización y conlleva a un incremento significativo en el consumo de sulfato de aluminio. Este fenómeno se extendió por 5 meses, desde diciembre hasta abril siendo más frecuente en este último mes, continuando su manifestación durante todo el año 2018 y hasta la actualidad.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, se declara como **situación problemática**, la necesidad de analizar las causas que provocan el sobreconsumo del sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) en el proceso de potabilización de la UBS Recepción y Suministro de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Se plantea como **problema científico**: Insuficiente conocimiento del incremento del consumo de sulfato de aluminio en el proceso de potabilización de la UBS Recepción y Suministro de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Se plantea como **objeto de la investigación**: consumo de sulfato de aluminio.

Se declara como **campo de acción**: canal mezclador.

Por lo que se declara como **Objetivo General**: Determinar las causas que provocan el consumo del sulfato de aluminio en la UBS Recepción y Suministro de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Teniendo en cuenta el objetivo general se plantea como **hipótesis de la investigación**: Si se determina las posibles causas que provocan el consumo de sulfato de aluminio, mediante métodos de correlación y regresión entonces será posible establecer el modelo matemático en relación con las variables significativas.

Objetivos específicos:

1. Realizar la búsqueda bibliográfica relacionada con la temática tratada en la investigación.
2. Analizar la base de datos creada con los parámetros del agua en función del consumo de sulfato de aluminio en el período de los años 2017 y 2018, según registro 348-R-14/PO2.
3. Emplear el método estadístico de regresión paso a paso hacia atrás con el uso del programa *Statgraphics Centurion XV.II*, para obtener el modelo matemático correspondiente.

4. Identificar las posibles causas que provocan el incremento en el consumo del sulfato de aluminio y proponer medidas para mejorar la eficiencia del proceso de potabilización.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo tiene como objetivo analizar los antecedentes y trabajos previos correspondientes a las características físicas-químicas del agua y del sulfato de aluminio uno de los reactivos que se emplean para el proceso de potabilización y exponer los aspectos teóricos que contribuyen a fundamentar la investigación.

1.1 Antecedentes de la investigación

Han pasado muchos años desde que sociedades lejanas empezaron a filtrar, hervir o almacenar el agua en vasijas de cobre para mejorar sus características y también para protegerse de las posibles enfermedades transmitidas por el necesario líquido. Las soluciones que se emplean para mejorar la calidad y la seguridad del agua para consumo humano, son el fruto de perfeccionar las técnicas utilizadas desde la antigüedad.

Entre los años 4000 y 2000 a.C.(AENOR, 2018), se utilizaban métodos de potabilización, como hervir el agua, ponerla al sol, filtrarla a través de carbón leña o de arena o almacenarla en recipientes de cobre.

Los egipcios, en los años 1500 y 400 a.C., purificaban el agua hirviéndola sobre el fuego, calentándola al sol o sumergiendo una pieza de hierro caliente dentro de la misma. Otro de los métodos más comunes era el filtrado a través de arena o grava para luego enfriar y reposo en vasijas de barro durante varios meses para precipitar las partículas e impurezas, luego mediante un sifón extraer el agua de la parte superior (decantación). En otras ocasiones incorporaban ciertas sustancias minerales y vegetales para facilitar la precipitación de partículas y clarificar así el agua (coagulación), entre ellas la piedra de alumbre, compuesta por sulfato de potasio o aluminio, que hoy en día se sigue usando para procesos de coagulación en las potabilizadoras modernas.

Los griegos tampoco ignoraban estas prácticas, como consta en los escritos de Hipócrates (460 a 354 a.C.) sobre la salud pública, en los que recomienda que el agua se hierva y se cuele antes de beber.

Los primeros métodos de tratamiento del agua (AENOR, 2018) consistían principalmente en mejorar sus características; eliminar su turbidez, color, olor o sabor desagradable. Posteriormente, cuando se descubrió una conexión clara entre el agua y ciertas enfermedades, la mayor preocupación fue hacer que el agua estuviera libre de microorganismos nocivos y fuera segura para el consumo humano.

En algún momento de la historia más reciente nace el concepto de agua potable, que engloba todas las características de seguridad microbiológica y cualidades físicas que la hacen inocua y agradable a nuestros sentidos, y la historia del tratamiento de ésta gira precisamente en torno al desarrollo de sistemas para conseguirla.

Uno de los primeros pasos hacia la purificación, fue la filtración, un ejemplo a gran escala fue la ciudad de Venecia, construida sobre islas rodeada de agua, pero no de consumo, por lo que dependía de la captura y almacenamiento de la lluvia. Para ello, bajo las plazas y espacios públicos, hábilmente enlosados para recoger el máximo de agua, se construyeron aljibes de almacenamiento bajo relleno de arena que actuaba como filtro, con una gradación del tamaño del grano para una mayor eficacia de la filtración, la cual se recogía en pozos, para abastecer a la población hasta finales del siglo XIX.

En los siglos XVIII y XIX, en Francia e Inglaterra, comienza la comercialización con la construcción de plantas de filtración y distribución en contenedores sellados. La esponja, carbón, lana y arena fueron promovidos como medios filtrantes durante este período, donde el italiano Luc Antonio Porzio y el francés Joseph Amy desarrollaron innovadores sistemas de filtración, este último consiguió en 1749 la primera patente para un filtro de agua emitida en el mundo y el londinense James Peacock, obtuvo la británica, a pesar de ser un fracaso, marcó el comienzo de un

período de experimentación, que dio como resultado los filtros lentos de arena que aún se utilizan.

En las décadas siguientes, alrededor del año 1804 fueron los escoceses los que tomaron la iniciativa, en la localidad de Paisley, John Gibb ideó el primer filtro capaz de abastecer toda una ciudad de agua filtrada y más adelante, en Glasgow se logró canalizarla misma hasta los consumidores.

En 1806 en París comienza a funcionar la mayor planta de tratamiento, la cual sedimentaban durante 12 horas antes de su filtración, con filtros que consistían en arena, carbón y su capacidad era de seis horas.

De una forma u otra, la desinfección del agua se ha practicado durante años, siendo la ebullición el método preferido durante siglos. Otros agentes desinfectantes utilizados a través del tiempo incluyen el cobre, el cloro, el ozono y la radiación ultravioleta.

La filtración combinada con la sedimentación fue un gran paso hacia la obtención del agua potable que conocemos hoy, los procesos de desinfección introducidos posteriormente fueron decisivos en la reducción del número de brotes epidémicos de enfermedades como el cólera, la disentería o la fiebre tifoidea. Aunque los suministros de agua crecieron en número a lo largo del siglo XIX, las condiciones sanitarias y de salud no comenzaron a mejorar radicalmente hasta la introducción de la desinfección con cloro a principios del siglo XX, el cual fue descubierto como elemento químico en 1807 por el británico Elmer Humphry Davy.

En Bélgica, en 1902 se puso en marcha la primera planta de cloración. También en Reino Unido comenzó, en los primeros años del siglo XX y tras el éxito en Europa, fue introducida en los Estados Unidos en 1908.

El ritmo de la invención y la innovación en el siglo XX y principios del XXI ha superado por mucho a todos los desarrollos que se ha producido a lo largo de los siglos anteriores (AENOR, 2018).

Para establecer una fuente de agua como potable es indispensable conocer cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua, como: color, turbidez, alcalinidad, pH, sólidos, entre otros, con el fin de determinar en qué condiciones se encuentra. Esto se realiza debido a la amplia gama de contaminantes, materia orgánica y sustancias químicas presentes en el agua que por sus propiedades puedan producir efectos adversos (Bedoya, 2012).

La potabilización se lleva a cabo mediante el proceso de coagulación-floculación, con el fin de llevar a cabo la remoción de la turbidez orgánica e inorgánica o sólidos suspendidos que no son susceptibles a sedimentarse rápidamente, así como la remoción de color verdadero y aparente, eliminación de virus, bacterias y microorganismos patógenos que presenten respuesta a estos métodos y también contribuyen con la destrucción de sustancias productoras de olor y sabor (Liliana, 2008).

Los coagulantes son considerados como compuestos químicos generalmente de hierro o aluminio o también como materiales naturales de origen vegetal, que son capaces de reaccionar con los componentes del agua (principalmente con la alcalinidad) para formar un precipitado voluminoso y absorbente (Martel, 2000). El coagulante que se cataloga como de mayor uso es el sulfato de aluminio conocido comúnmente como alumbre, es importante tener en cuenta la cantidad a utilizar la cual debe ser definida con anterioridad por medio de procedimientos como el Ensayo de Jarras. Esta dosis óptima es considerada como el volumen indicado de coagulante a una concentración determinada con la cual se logrará conseguir la formación de flóculos con mayor compactación y velocidad de sedimentación, lo que a su vez permitirá obtener un mayor porcentaje de reducción de la turbidez (Liliana, 2008).

En el año 2003 en Salisbury, Australia se desarrolló una investigación con el fin de establecer un método más preciso para la determinación de la dosis óptima de coagulante y la relación con los parámetros fisicoquímicos dentro de un sistema de tratamiento de potabilización de aguas, donde se realizó una correlación entre

cada parámetro fisicoquímico frente a una dosis de coagulante, los cuales a su vez fueron las variables de entrada de la red neuronal (RNA), teniendo definido un rango en el que debían permanecer para lograr realizar el entrenamiento de la red (H. R. Maier, 2004). Durante este mismo año se propone un Programa predictor de dosis óptima de coagulante compuesto por diferentes algoritmos basados en la lógica de las RNA, donde se encuentra caracterizado el comportamiento de distintos cuerpos de agua y al ingresar en él los valores de turbidez, color y alcalinidad medidos previamente, arroja como resultado un valor de dosificación de agente coagulante (W. López, 2004).

El Instituto Tecnológico de Costa Rica, mediante el Centro en Protección Ambiental, (Castillo, 2006) a través de un proyecto pretendieron, determinar, caracterizar y evaluar las posibilidades técnicas, ambientales y económicas de utilizar algunos materiales de origen nacional como coagulantes y/o floculantes en el tratamiento de aguas. Esto, con la finalidad de tratar de encontrar procesos que generen menos gasto, y en algunos casos minimizar el impacto ambiental al utilizar residuos que generalmente son desechados.

En el año 2011 se realizó un estudio sobre el efecto de la turbidez en la eficiencia del proceso de potabilización de agua en una planta de tratamiento en el Cauca, Colombia, donde se determinó que el nivel de eficiencia del proceso de coagulación y floculación está directamente relacionado con las variaciones que pueda tener la turbidez del agua que se está tratando, comprometiendo el desempeño de la filtración y la sedimentación ya que problemas en la operación, como una coagulación inadecuada, afectan el desempeño de las unidades de clarificación y los lechos filtrantes (C. Montoya, 2011).

Posteriormente en el año 2012 se realizó un estudio sobre la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento de Villa Santana, Colombia, a través del Ensayo de Jarras, donde evidenció que los parámetros físico-químicos del agua varían en relación con el tiempo climático, ya que los días

que se presentaban precipitaciones eran los días donde se recolectaban muestras con mayor variación de la turbidez(Bedoya, 2012).

El Ensayo de Jarras se cataloga como el método más utilizado para la determinación de la dosificación de coagulantes dentro del proceso de potabilización de aguas, seguido por el *StreamingCurrent Detector* (SCD), (Sibiya, 2014) el cual se ha implementado como una herramienta que permite ejercer un control más efectivo sobre el cálculo de la dosis, sin embargo el funcionamiento adecuado de este equipo se encuentra sujeto a la obtención de un punto óptimo de funcionamiento que en ocasiones es definido de manera errada (Sibiya, 2014). Esto ocasionó que se iniciara la utilización de tecnologías que permitieran obtener un mayor grado de efectividad en el cálculo del volumen de coagulante a emplear, optando por la implementación de Técnicas de Inteligencia Artificial.

En el año 2015 se realizó un estudio con el fin de determinar la dosis óptima en mezcla de sulfato de aluminio y polímeros naturales para la clarificación del agua del Río Tuy, del Estado Miranda, de Venezuela. Los tratamientos para la clarificación del agua se ejecutaron por medio de una matriz experimental con diseño Box-Behnken, dos factores experimentales X_1 : sulfato de aluminio (ppm) y X_2 : almidón de yuca (ppm) y tres respuestas: turbidez (NTU), color y pH. La importancia de este estudio se basa en disminuir las concentraciones de sulfato de aluminio con combinaciones de polímeros naturales (polielectrólitos), la cual permitió alcanzar una efectividad de 99,03 %, para obtener valores bajos de turbidez y color. Por lo que concluyó que la mezcla de sulfato de aluminio con almidón de yuca tiene buena calidad como coagulante y floculante y pueden ser utilizados en el tratamiento físico y químico de las aguas superficiales(José F. Hernández G., 2015).

En este mismo año, (López, 2015) en Colombia se evaluó la eficacia del quitosano como coagulante durante el tratamiento del agua cruda proveniente de la cuenca media del río Guatapurí, para tal fin se determinó la dosis óptima del polímero

orgánico en agua con turbidez inicial de 100 y 1500 NTU. Las remociones alcanzaron hasta el 99,0 % de la turbidez, demostrando que es eficaz. Precizando que en el caso del quitosano, se usa un menor volumen de la solución coagulante. Resultados similares a los encontrados en esta investigación se señalan remociones de turbidez entre 98,22 y 99,63 % en el tratamiento de agua para consumo humano; por otra parte, con el empleo del mucílago de *Opuntia wentiana*, se consiguieron porcentajes de remoción que oscilaron entre 85,25 y 94,84 % antes de la filtración y después de la filtración fue de 91,82 y 98,34 %, respectivamente. Así mismo se logró disminuir la turbidez de 75 y 150 NTU a valores de 14,9 y 8,4 NTU con el empleo de las semillas de *Moringa oleifera*, el comportamiento de la remoción fluctuó entre 80,1 y 94,3 % ensayando *Moringa oleifera* como coagulante alternativo en la potabilización del agua cruda. En ese mismo sentido otros investigadores usando el mucílago del nopal "*Opuntia ficus-indica*", muestran la efectividad de los coagulantes orgánicos e inorgánicos en la remoción de la turbidez del agua del río Magdalena logrando con alumbre (99,80 %); siendo la remoción con *Opuntia* menor (93,25 %).

1.2. DESCRIPCIÓN DE PROCESOS DE TRATAMIENTO EN LA PLANTA

1.2.1 Proceso de Coagulación-Floculación

La coagulación-floculación (Comisión Nacional del Agua, 2014) es el proceso mediante el cual se añaden compuestos químicos al agua para reducir las fuerzas que separan a los sólidos suspendidos menores a 10 μm (orgánicos e inorgánicos) para que formen aglomerados que sean removidos del agua por sedimentación. En la coagulación, las fuerzas interpartícula, responsables de la estabilidad de los coloides, son reducidas o anuladas por la adición de reactivos apropiados, la que se realiza mediante un mezclado rápido para dispersar el coagulante y favorecer su contacto con las partículas en suspensión. En la floculación, las colisiones entre las partículas favorecen el crecimiento de flóculos que puedan ser eliminados por sedimentación, en la que se efectúa una mezcla lenta con el fin de promover la formación y el aumento de tamaño y/o densidad de los flóculos

formados. Estos últimos son eliminados finalmente del agua por medios físicos como la sedimentación, flotación o filtración.

Los contaminantes que se eliminan por coagulación son aquellos que poseen una altamasa molar y son hidrófobos. De esta forma, se elimina sólidos suspendidos, color aparente, material coloidal, algunos precursores de trihalometanos, y moléculas grandes que se adsorben poco en carbón activado. La coagulación floculación no es efectiva para eliminar compuestos orgánicos solubles.

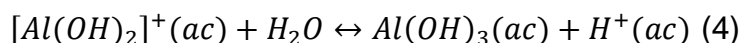
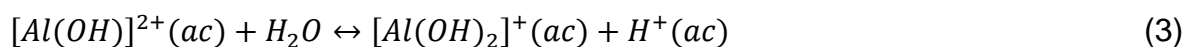
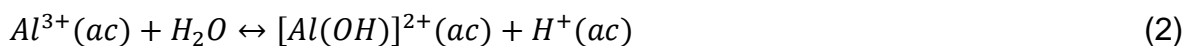
1.2.1.1 Principales reactivos que se emplean para el proceso de tratamiento del agua

Entre los derivados del aluminio el más utilizado es el sulfato de aluminio, también se puede utilizar el aluminato de sodio y los policloruros de aluminio (PACs), cuando compiten en rentabilidad con los otros compuestos por su mayor eficiencia y menor formación de lodos.

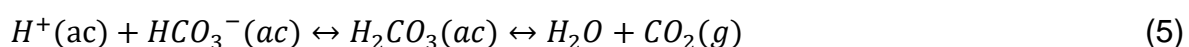
Dentro de estos reactivos se encuentran los siguientes:

- **Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$**

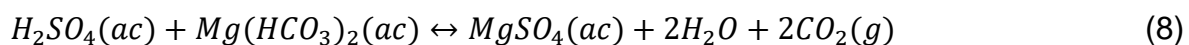
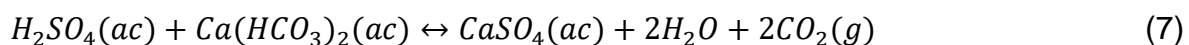
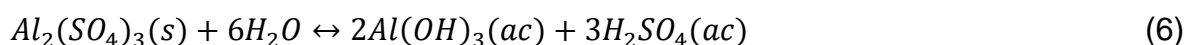
El sulfato de aluminio en el comercio se encuentra en forma de terrones, en granulado y en polvo, es una sal ácida y por consiguiente corrosiva para la mayor parte de los metales, se disuelve fácilmente en agua y puede ser aplicable en solución o en seco. En la planta este reactivo es utilizado como coagulante (Comisión Nacional del Agua, 2014)teniendo gran efecto en reacciones con algunos constituyentes naturales como la alcalinidad natural y otros elementos. La acción del sulfato de aluminio consiste en su hidrólisis, que termina con la formación de gel hidróxido de aluminio que precipita y dióxido de carbono libre. Después de introducir el sulfato de aluminio en el agua ocurren las reacciones 1, 2, 3 y 4:



La formación de hidróxido de aluminio representa una materia coloidal cuyas unidades tiene carga positiva, mientras los coloides contenidos en las aguas naturales están cargados negativamente, esto conlleva a la neutralización de las cargas de las partes de ambos coloides que provoca la coagulación recíproca con la formación de copos que precipitan. Los iones de hidrógenos que se liberan después de la hidrólisis del sulfato de aluminio se enlazan con los iones de hidrógeno carbonatos que se encuentran en las aguas naturales, según la reacción 5.



Gracias a estos además de la clarificación del agua se logra la disminución de la rigidez carbonatada hasta (0,7 a 1) mg/L con el aumento simultáneo de la rigidez no carbonatada, como se muestra en las reacciones 6, 7 y 8.



Con un exceso de alcalinidad los copos de hidróxidos de aluminio no se forman ya que se forma un complejo con carga negativa. Con una alcalinidad insuficiente el hidróxido de aluminio no se forma, por estas razones se debe mantener estable el valor del pH de 6,9 a 8 para que el contenido de iones no afecte la hidrólisis y mantenga la reserva alcalina de 1mg- equiv/litro en el agua y cuando es insuficiente el pH hay que alcalinizar con cal.

- **Floculantes**

Con frecuencia, la coagulación no resulta en un proceso eficiente de separación debido a que los coágulos formados tienen velocidades muy lentas de sedimentación o son muy frágiles y se rompen en los procesos. Para controlar estos problemas se emplean floculantes como el denominado A-130 (Comisión Nacional del Agua, 2014).

- **Cal hidratada**

La cal hidratada se dosifica con el fin de aumentar la alcalinidad y el pH del agua.

- **Cloro gaseoso**

La cloración es un método químico para descontaminar el agua basada en la oxidación de las sustancias que forman parte de los protoplasmas de células de los microorganismos, la cual se efectúa por el cloro, cloruro de cal, hipocloritos y cloraminas. Es de gran importancia entender las complejidades de la acción desinfectante del mismo, y de los sistemas de cloración.

El cloro gaseoso tiende a disminuir el pH del agua, mientras que los hipocloritos tienden a aumentarlo. Es importante tener en cuenta que ambas formas no poseen el mismo efecto microbiano. El ácido hipocloroso tiene un efecto superior atribuible a su poder oxidante fuerte y a su neutralidad eléctrica, la cual le permite penetrar fácilmente en la célula microbiana. El ión hipoclorito posee un efecto microbicida muy débil, prácticamente despreciable, su carga negativa no le permite penetrar fácilmente en la célula. Independientemente del agente empleado en la cloración, así como el método utilizado para su dosificación, la concentración de forma activa de cloro necesario para la desinfección de aguas naturales es única y depende fundamentalmente del pH, tiempo de contacto y forma activa del cloro

(Comisión Nacional del Agua, 2014).

1.2.2.Floculadores-clarificadores

Los floculadores-clarificadores con frecuencia son denominados unidades de contacto de sólidos, floculadores de lechos de lodos o tanques ascendentes. Combinan el proceso de la floculación con la sedimentación en un solo tanque, y cuenta con equipo para adicionar los reactivos (coagulantes o ablandadores) en la tubería de entrada. La mezcla se realiza en una mampara cónica central donde se mantiene una baja concentración de flóculos. El fluido es de ahí pasado a través de una campana, directo a un lecho de lodos ubicado en la parte baja del tanque, donde se promueve el crecimiento de los flóculos y la sedimentación. Finalmente, el agua libre de sólidos fluye hacia arriba en la zona periférica del sedimentador hasta la canaleta de recolección.

Estas unidades son particularmente útiles para el ablandamiento con cal de agua subterránea, puesto que los precipitados formados sirven como semilla para el crecimiento de flóculos, favorecen la precipitación y el espesado de los lodos. También, estos equipos son cada vez más empleados para el tratamiento de aguas industriales, así como en potabilizadores de aguas superficiales. Su principal ventaja es el menor empleo de espacio y la reducción de los costos de inversión. Sin embargo, hacer varias operaciones en un solo tanque resta flexibilidad al proceso. Por ello, se emplean más para el ablandamiento que para la coagulación-floculación (Comisión Nacional del Agua, 2014).

Los criterios usuales para este tipo de unidades son 30 minutos como mínimo en las zonas de floculación y mezclado con al menos dos horas para la sedimentación cuando se trata aguas superficiales y de una hora para la precipitación con cal de agua subterránea. El volumen de los lodos extraídos en forma diaria no debe ser mayor del cinco por ciento del agua tratada cuando se elimina turbiedad o de tres por ciento para el ablandamiento.

1.2.3. Sedimentación

La sedimentación o clarificación es la remoción de partículas, flóculos químicos y precipitados de una suspensión en un sedimentador que actúa por gravedad. Se emplea para eliminar la fracción de sólidos sedimentables de los que están en suspensión (60% perceptibles a simple vista en el agua). Se consideran sólidos sedimentables a las partículas que por su tamaño y peso sedimentan en una hora. Estos sólidos pueden ser los originalmente presentes en el agua, o bien, los flóculos o precipitados formados durante algún tipo de proceso químico.

Los sólidos en suspensión de las aguas superficiales y subterráneas (Comisión Nacional del Agua, 2014), están compuestos de un amplio espectro de partículas de diferentes tamaños y características. En general, las mayores decantan con velocidades rápidas, adelantándose a las partículas más finas durante su descenso. El viento, las perturbaciones hidráulicas, corrientes inducidas por densidad o temperatura producen efectos de corte y turbulencia que aumentan el

contacto entre partículas. Si cualquiera de las partículas que interactúan tiene características aglomerantes, se da un crecimiento de flóculos. Cuanto mayor es la profundidad del tanque mayor es el tiempo de contacto. Por tanto, la eliminación depende de la profundidad del tanque, así como de las propiedades del fluido y de las partículas.

La mayor parte de los clarificadores son de flujo ascendente, pues el agua sube desde su entrada hasta los drenes del efluente. En efecto, el agua que entra al tanque de sedimentación es forzada a ir al fondo mediante una mampara hasta un punto a partir del cual asciende, rebosando por los vertedores hasta la canaleta de recolección. Las partículas floculadas sedimentan, en dirección contraria al flujo y son continuamente removidas del fondo del tanque por medio de un mecanismo de rastras. Las partículas con velocidad de sedimentación superior a la carga hidráulica son retenidas, en tanto que las más ligeras, con velocidades inferiores salen del tanque junto con el efluente.

La función primaria de los sedimentadores es eliminar materia decantable pero además, deben permitir recoger y descargar los lodos que se crean, así como concentrarlos, de manera que se eliminen con el menor contenido de humedad posible para facilitar su manejo, tratamiento y disposición.

Por otra parte; debido a que en la práctica una fracción de la materia en suspensión del agua está compuesta de sólidos de baja densidad que flotan más que decantar, el sedimentador debe estar provisto de un sistema que permita recogerlos y evacuarlos. A estos sólidos se les asigna el nombre de espumas y contienen también grasas y aceites (Comisión Nacional del Agua, 2014).

1.2.4. Filtración

El proceso de filtración (Comisión Nacional del Agua, 2014) es uno de los más frecuentemente empleados para potabilizar aguas superficiales. Se emplea con o sin pretratamiento de coagulación y sedimentación (filtración directa), para eliminar

los sólidos presentes originalmente en el agua, o los precipitados, el caso en estudio incluye el pretratamiento.

Un filtro típico tiene un tanque de concreto de profundidad aproximada mayor a 2,7 m. El espesor típico del medio es de 0,6 a 0,75 m y se encuentra colocado sobre grava y un bajo dren o falso fondo. Para la prefiltración, el agua pasa en sentido descendente por el filtro por la fuerza que ejerce la columna de agua sobre el lecho, así como la succión del bajo dren. Son lavados por medio del cambio de la dirección del flujo (en sentido ascendente) en un proceso que se denomina retrolavado. Una canaleta colocada sobre el filtro, a una altura determinada, recoge el agua de lavado.

Los tipos más comunes para plantas de potabilización de gran tamaño (mayor de 500 L/s) son de flujo descendente (por gravedad) y de medio dual (arena-antracita) y con solo arena. El esquema más frecuente para la potabilización de cuerpos superficiales consiste en combinar la coagulación-floculación con una sedimentación previa a la filtración. La tasa de filtración usual es de 5,0 a 25 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ con un valor máximo de diseño de 12 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$.

Aunque se utilicen velocidades de filtración elevadas, la mayor parte de los sólidos se eliminan en las capas superiores (primeros 0,25 m) del medio filtrante. La presión negativa, menor que la atmosférica, se presenta cuando la pérdida de carga excede a la columna de agua disponible y favorece la formación de bolsas de aire (liberación de los gases disueltos en el agua), lo cual reduce el área efectiva de filtración. Este fenómeno conocido como “embolia” reduce la corrida de filtración.

Pretratamiento del agua

La coagulación es esencial para remover las partículas muy finas que de otra forma lograrían salir del filtro. Si se emplea una cantidad excesiva de floculante se forma aglomerados muy gruesos que recubren y se depositan en la parte superior de filtro tapando el paso al agua. Sin embargo, flóculos muy pequeños pueden

atravesar el filtro. Por ello, la operación adecuada de un filtro debe ser analizada en forma conjunta con la coagulación. La filtración óptima ocurre cuando los floculos coagulados no sedimentables son retenidos en los poros de todo el filtro para lograr verdaderamente la filtración “en profundidad”.

Cuando la concentración de la materia en suspensión de un agua es baja, resulta a veces útil añadir pequeñas dosis de coagulantes (sulfato de aluminio, cloruro de hierro(III), polielectrolitos) antes de la filtración con el fin de que flocule la suspensión en el interior del medio filtrante. Con este pretratamiento el mecanismo de separación en el filtro pasa de una eliminación por tamizado a una por adsorción la cual consume menos carga por unidad de sólidos separados.

Medio filtrante

El medio ideal para la filtración (Comisión Nacional del Agua, 2014) debe poseer las siguientes características:

Ser lo suficientemente grueso para tener intersticios entre los granos con gran capacidad de almacenamiento, pero a la vez, suficientemente fino para retener el paso de los sólidos suspendidos. Debe tener una altura adecuada para proporcionar la duración de corrida deseada y una graduación que permita un lavado eficiente (poco dispersa). Como medio se utiliza arena, antracita, tierra de diatomeas, perlita y carbón activado en polvo o granulado. Un filtro se puede rellenar con un sólo tipo de medio o una combinación de éstos. El medio más común empleado es la arena de sílice y para filtros duales, arena con antracita. Se emplea carbón activado como medio filtrante cuando se pretende no sólo eliminar los sólidos en suspensión, sino también remover los materiales disueltos por adsorción.

1.2.5. Desinfección

La cloración se emplea en la potabilización para destruir patógenos, controlar problemas de olor, remover hierro y manganeso y para eliminar nitrógeno amoniacal.

El cloro tiene una fuerte afinidad por varios compuestos y elementos, particularmente por los agentes reductores, pues tiene una gran tendencia a ganar electrones y formar ión cloruro o compuestos organoclorados. El mismo reacciona frecuentemente con el hierro, manganeso, dióxido de nitrógeno, ácido sulfhídrico, así como con la mayor parte de los compuestos orgánicos presentes. Las reacciones con los compuestos inorgánicos en general son rápidas, mientras que con los orgánicos son muy lentas y su grado de desarrollo depende de la cantidad de cloro disponible.

El cloro es un compuesto muy reactivo, la bruma de cloro es muy corrosiva por lo que los equipos dosificadores deben ser de aleaciones especiales o no metálicas. El gas es sacado del contenedor por medio de una válvula conectada en la parte superior. El cloro líquido se evapora dentro de éste antes de salir. El diseño y la instalación de los equipos debe ser tal que se evite al máximo cualquier fuga asociada con las operaciones de conexión, vaciado o desconexión de los tanques.

No existen tablas o dosificaciones universales (Comisión Nacional del Agua, 2014) de la cantidad de cloro que se deba añadir para potabilizar el agua, pues ello depende de sus características. Se debe, entonces, determinar en el laboratorio la demanda de cloro y la cantidad suficiente para mantener un residual que proteja al agua durante su transporte. De hecho, la medición de este residual constituye la prueba esencial de la potabilidad de un agua y es muy útil ya que se correlaciona directamente en el contenido de coliformes totales y fecales, evitando realizar tediosas determinaciones en forma rutinaria.

Para determinar la dosis óptima, se deben realizar pruebas de laboratorio agregando cantidades crecientes de cloro al agua y midiendo su concentración a través del tiempo. La dosis óptima será la que produzca un residual de cloro libre, siendo de 0,2 a 1,5 mg/L para agua potable al final del período de contacto (Comisión Nacional del Agua, 2014).

1.3. Descripción del flujo tecnológico del proceso de potabilización

El proceso de tratamiento de agua (Figura 1.3.1) se realiza por varias etapas fundamentales como son: estación de bombeo, cámara de distribución, bloque de tratamiento, tanques de almacenaje y conductora de agua.

La captación del flujo de agua del río (1) se hace mediante la estación de bombeo debajo de la cortina de la presa alimentadora, que proviene de la presa a través de una tubería de hormigón diseñado para conducir dos m³/s hasta la cámara de succión de las bombas de la estación de bombeo. La antecámara consta de dos partes, una delantera a cielo abierto que sirve como disparador, esta parte consta de un aliviadero capaz de evacuar 0,2 m³/s en caso de avería y de una rejilla metálica de limpieza manual a través de la cual el agua pasa hacia la otra parte de la antecámara de succión propiamente dicha. De la cámara de succión a través de bombas, se realiza la descarga mediante una tubería que consta de una válvula de mariposa en serie. La norma de consumo de la estación de bombeo es de 0,37 kW/m³. De aquí pasa a un cabezal común de un metro de diámetro, del cual salen dos líneas paralelas con válvulas que la conducen hasta la cámara distribuidora, dicha tubería consta de una instalación contra golpe de ariete como medida de seguridad y un *By-pass* de agua cruda con el objetivo del abastecimiento de esta a los lugares que no sea posible la utilización del agua potable en la empresa, parte de esta (4) se alimenta a la Empresa Pedro Sotto Alba (PSA). En condiciones normales operan cuatro bombas y dos líneas por las cuales se suministran 1 940 L/s aunque en caso de avería o reparaciones de una de las líneas el suministro de agua (2) a la cámara distribuidora puede ser para una línea. Es un dispositivo descubierto en forma de rectángulo, donde se distribuye el agua a diferentes puntos entre unos 600 L/s hacia la planta potabilizadora de la empresa, donde previamente se hace una inyección de cloro (tres a cuatro) mg/L en el mezclador tubular vertical, con el objetivo de eliminar gérmenes patógenos que podrían contaminar cualquier dispositivo de la planta, fundamentalmente los filtros.

Después de la toma del flujómetro de agua cruda (6) se le inyecta el sulfato de

aluminio (8), con el objetivo de aumentar el tiempo de contacto del mismo con los sólidos en suspensión, donde la norma de concentración de la solución de consumo es de 20 mg/L. En el mezclador tubular vertical se agregan los reactivos químicos tales como: el floculante (10) con una concentración de consumo de 0,2 mg/L y cal hidratada (9) con 10,0 mg/L. De aquí el agua pasa a una cámara distribuidora situada a todo lo ancho de siete clarificadores a tres y seis metros del eje del mezclador, donde se distribuye por siete tubos hacia las dos zonas de clarificación del clarificador, situado de las partes extremas de cada uno de estos. Para éste la tubería se fisura en dos ramas perforada por tres orificios, los cuales van conectados los recirculadores de lodo (13).

Estos recirculadores actúan como eyectores arrastrando gran cantidad de lodo depositado en el fondo del clarificador por medio de la velocidad de salida del agua y de esta forma se produce la recirculación del mismo, se logra una mayor capacidad de producción y una mejor estabilidad en el proceso, teniendo en cuenta que este lodo posee gran cantidad de los reactivos que se emplean por lo que es reutilizado en el proceso. El colchón de lodo que se forma producto de la sedimentación actúa como medio filtrante.

El agua clarificada (12) asciende y rebosa por las ventanas situadas en las canaletas en el borde superior desde donde pasa a un canal colector y de aquí a los filtros mecánicos. La tubería que conduce el agua hasta los filtros está rematada en forma de campana invertida para formar la menor turbulencia posible. El lodo sedimentado y el residuo en suspensión del colchón de lodo de las zonas de clarificación pasa a una zona central del clarificador (zona de concentración), las cuales aseguran una sección continua del residuo sobrante de la capa en suspensión. Este es evacuado a través de una tubería perforada hacia los sedimentadores de lodo, una vez que se ha clarificado el agua pasa a los filtros mecánicos. El agua atraviesa el lecho filtrante del filtro compuesto por antracita triturada de una granulometría de (0,8 a 1,8) mm y altura de la capa de 0,7 m, arena cuarzo de (0,5 a 1,2) mm y una altura de la capa de 0,5 m. El agua pasa a la capa de drenaje compuesta por 700 mm de grava de diferente granulometría distribuida de menor a mayor tamaño en el sentido de filtración de

la siguiente forma: grava: (2 a 4)-100 mm, (8 a 4)-150 mm, (8 a 16)-150 mm y por último de (16 a 32)-300 mm.

Luego pasa a un colector general, dividido en dos colectores, uno para los filtros de salida al tanque A y otro para los filtros al tanque B. A estas dos tuberías se le inyecta cloro para mantener una concentración de (0,3 a 0,7) mg/L de acuerdo a las normas empleadas por el sistema de calidad de la planta. Una vez que el agua (14) se encuentra en los tanques de almacenaje se suministra a toda la zona industrial del municipio principalmente la Empresa Ernesto Che Guevara a través de la conductora maestra formada por dos tuberías aéreas que la conduce por gravedad, parte de esta agua (16) es suministrada a la población del Municipio (Manual de Operaciones, 2016).

En la figura 1.3.1 se muestra el flujo tecnológico de la planta:

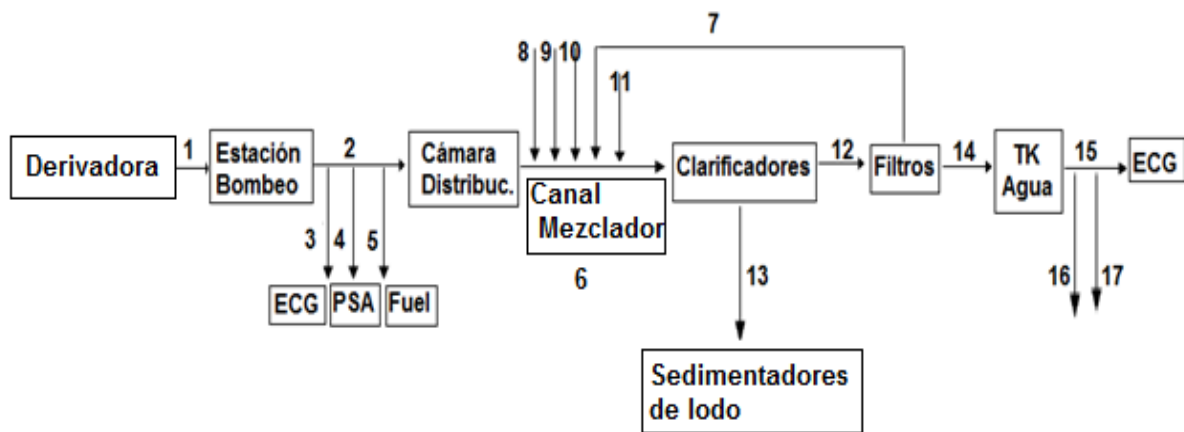


Figura 1.3.1 Flujo tecnológico de la planta potabilizadora de agua.

Donde:

- 1- Flujo de agua del embalse
- 2- Flujo de agua de la Cámara de Distribución
- 3- Flujo de agua cruda ECG
- 4- Flujo de agua cruda PSA
- 5- Flujo de agua cruda Grupo Fuel
- 6- Flujo de agua cruda de entrada
- 7- Flujo de agua de retorno

- 8- Solución del sulfato de aluminio
- 9- Solución Cal hidratada
- 10-Solución floculante A-130
- 11-Agua Clorada
- 12-Flujo de agua clarificada
- 13-Lodo a los SD
- 14-Flujo agua filtrada
- 15-Flujo agua potable ECG
- 16-Flujo agua potable población
- 17-Otros consumidores

1.4. Características físicas-químicas del agua

1.4.1. Color

Es el resultado de la presencia de materiales de origen vegetal tales como ácidos húmicos, turba, plancton, y de ciertos metales como hierro, manganeso, cobre y cromo, disueltos o en suspensión. Constituye un aspecto importante en términos de consideraciones estéticas. Los efectos del color en la vida acuática se centran principalmente en aquellos derivados de la disminución de la transparencia a la luz solar (AWWA CF, 1992). Puesto que estas propiedades se asocian comúnmente con la presencia de compuestos para su eliminación, se emplean los procesos de aireación, oxidación (permanganato de potasio, ozonización, oxidación con ozono y peróxido de hidrógeno, dióxido de cloro o cloración) y adsorción (carbón activado en polvo y grano); de acuerdo a la NOM127 también se puede utilizar la coagulación-floculación-sedimentación-filtración (Comisión Nacional del Agua, 2014).

1.4.2. Turbidez

La presencia de materia suspendida en el agua puede indicar un cambio en su calidad (por ejemplo, contaminación por microorganismos) y la presencia de sustancias inorgánicas finamente divididas (arena, fango, arcilla) o de materiales orgánicos. La turbidez del agua interfiere con usos recreativos y el aspecto

estético del agua, constituye un obstáculo para la eficacia de los tratamientos de desinfección, y las partículas en suspensión pueden ocasionar gustos y olores desagradables por lo que el agua de consumo debe estar exenta de las mismas (AWWA CF, 1992). Para su eliminación se recurre a la filtración del agua por la alta confiabilidad que este proceso tiene para producir una calidad constante. Sin embargo, debido a la variabilidad de los sólidos presentes en el agua, la presencia ocasional o no de elevadas concentraciones (superiores a 100 mg/L) y la presencia de sólidos muy finos se aplican en forma previa a la filtración procesos de coagulación-floculación para hacer más eficiente y rentable el proceso (Comisión Nacional del Agua, 2014).

1.4.3. pH

Se define como el logaritmo de la inversa de la concentración de protones, ecuación 1.4.1:

$$pH = \log \frac{1}{c(H^+)} = -\log c(H^+) \quad (1.4.1)$$

Es una propiedad básica e importante que afecta a muchas reacciones químicas y biológicas. Es un factor muy importante en los sistemas químicos y biológicos de las aguas naturales. El valor del pH compatible con la vida piscícola está comprendido entre cinco y nueve. Sin embargo, para la mayoría de las especies acuáticas, la zona de pH favorable se sitúa entre 6,0 y 7,2. La alcalinidad es la suma total de los componentes en el agua que tienden a elevar el pH del agua por encima de un cierto valor (bases fuertes y sales de bases fuertes y ácidos débiles), y, lógicamente, la acidez corresponde a la suma de componentes que implican un descenso de pH (dióxido de carbono, ácidos minerales, ácidos poco disociados, sales de ácidos fuertes y bases débiles). Ambos, alcalinidad y acidez, controlan la capacidad de tamponamiento del agua, es decir, su capacidad para neutralizar variaciones de pH provocadas por la adición de ácidos o bases. El principal sistema regulador del pH en aguas naturales es el sistema carbonato (dióxido de carbono, ión bicarbonato y ácido carbónico)(AWWA CF, 1992). El

ajuste de pH es importante realizarlo cuando su aplicación permite reducir el costo total de la potabilización por el empleo de los procesos (Comisión Nacional del Agua, 2014).

1.4.4. Alcalinidad

La alcalinidad en el agua tanto natural como tratada, usualmente es causada por la presencia de iones carbonatos (CO_3^{2-}) e hidrógeno carbonatos (HCO_3^-), asociados con los cationes sodio, potasio, calcio y magnesio. Se aplica para la determinación de la alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos, en aguas naturales, domésticas,

* Entiendase $c(\text{H}^+)$ como $c(\text{H}_3\text{O}^+)$

industriales y residuales. La medición de la alcalinidad, sirve para fijar los parámetros del tratamiento químico del agua, y para el control de la corrosión y la incrustación en los sistemas que utilizan agua como materia prima o en su proceso (AWWA CF, 1992).

1.4.5. Dureza Cálctica y Magnésica

La dureza del agua se debe a la existencia de determinados cationes disueltos en agua que interfieren en la producción de espuma de los jabones de sodio y potasio, debido a la formación de un precipitado insoluble. La constituyen todos los cationes polivalentes disueltos y debido a la alta proporción de sales de calcio y magnesio frente a los demás cationes, se suele asociar la dureza con contenidos en sales cálcicas y magnésicas. Una dureza excesiva es controlada mediante el ablandamiento para lo cual se puede emplear la cal o la sosa para precipitar el calcio y magnesio (Comisión Nacional del Agua, 2014).

1.4.6. Sólidos totales disueltos

De forma genérica se puede denominar sólidos a todos aquellos elementos o compuestos presentes en el agua que no son agua ni gases. Atendiendo a esta

definición se pueden clasificar en dos grupos: disueltos y en suspensión. La medida de sólidos totales disueltos (STD) es un índice de la cantidad de sustancias disueltas en el agua, y proporciona una indicación general de la calidad química y está definido analíticamente como residuo filtrable total (en mg/L). Los principales aniones inorgánicos disueltos en el agua son carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos y nitratos. Los principales cationes son calcio, magnesio, sodio, potasio, amonio, etc. Por otra parte, el término sólidos en suspensión, es descriptivo de la materia orgánica e inorgánica particulada existente en el agua (aceites, grasas, arcillas, arenas, fangos, etc.). La presencia de sólidos en suspensión participa en el desarrollo de la turbidez y el color del agua, mientras que la de sólidos disueltos determina la salinidad del medio, y en consecuencia la conductividad del mismo (AWWA CF, 1992).

1.4.7. Cloro

El cloro elemental es un gas amarillo-verdoso altamente soluble en agua. Cuando se disuelve en ausencia de sustancias nitrogenadas (con la materia orgánica nitrogenada forma cloraminas) u otros productos que puedan interferir, el cloro es rápidamente hidrolizado a ácido hipocloroso (HOCl) y ácido clorhídrico (HCl). A su vez el ácido clorhídrico se disocia fácilmente a iones hidrógeno y cloruro, mientras que el ácido hipocloroso, que es un ácido débil, se disocia parcialmente en iones hidrógeno e iones hipoclorito (OCl^-). El ión cloruro se encuentra ampliamente distribuido en el medio ambiente, generalmente en forma de cloruro sódico, potásico o cálcico. El gran inconveniente de los cloruros es el sabor desagradable que comunican al agua. Son también susceptibles de ocasionar una corrosión en las canalizaciones y en los depósitos, en particular para los elementos de acero inoxidable (AWWA CF, 1992).

1.4.8. Materia orgánica

La materia orgánica existente en el agua, tanto la que se encuentra disuelta como en forma de partículas, se valora mediante el parámetro carbono orgánico total (TOC, *total organic carbon*). Los compuestos orgánicos existentes en el medio

acuático se pueden clasificar en dos grandes grupos atendiendo a su biodegradabilidad, es decir, a la posibilidad de ser utilizados por microorganismos como fuente de alimentación y para su medida se utilizan los parámetros denominados Demanda Química de Oxígeno(DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno(DBO) (AWWA CF, 1992).

1.4.9. Conductividad

La conductividad eléctrica de una solución es una medida de la capacidad de la misma para transportar la corriente eléctrica y permite conocer la concentración de especies iónicas presentes en el agua. Como la contribución de cada especie iónica a la conductividad es diferente, su medida da un valor que no está relacionado de manera sencilla con el número total de iones en solución. Depende también de la temperatura. Está relacionada con el residuo fijo por la expresión $\text{conductividad } (\mu\text{S/cm}) \times f = \text{residuo fijo (mg/L)}$. El valor de f varía entre 0,55 y 0,9 (AWWA CF, 1992).

1.4.10. Temperatura

La temperatura de las aguas residuales y de masas de agua receptora es importante a causa de sus efectos sobre la solubilidad del oxígeno y, en consecuencia, sobre las velocidades en el metabolismo, difusión y reacciones químicas y bioquímicas. El empleo de agua para refrigeración (por ejemplo, en las centrales nucleares) conlleva un efecto de calentamiento sobre el medio receptor que se denomina “contaminación térmica”. Su alteración suele deberse a su utilización industrial en procesos de intercambio de calor (refrigeración). Influye en la solubilidad de los gases y las sales. Temperaturas elevadas implican aceleración de la putrefacción, con lo que aumenta la DBO y disminuye el oxígeno disuelto. (AWWA CF, 1992).

1.5. Conclusión Capítulo 1

En el capítulo se analizaron los antecedentes y trabajos previos correspondientes a las características física-químicas del agua y del sulfato de aluminio y se expone los aspectos teóricos que contribuyen a fundamentar la investigación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo tiene como objetivo describir los materiales y métodos empleados en la investigación, así como analizar experimentalmente cada uno de los parámetros del agua a tener en cuenta y describir la metodología para el estudio estadístico mediante métodos de correlación y regresión.

2.1 Reactivos, materiales y equipos empleados en la investigación

En la realización de esta investigación se utilizan los siguientes reactivos:

- Sulfato de aluminio
- Cal Hidratada
- Cloro gaseoso
- Floculante A-130
- Hidróxido de sodio, $c(0,02 \text{ mol/L})$
- Ácido sulfúrico, $c(0,02 \text{ mol/L})$
- E.D.T.A. ácido etilendiaminotetraacético, $c(0,02 \text{ mol/L})$

Los materiales utilizados fueron los siguientes:

- Agua cruda que entra al proceso de potabilización (PA2): La materia prima usada en el proceso es el agua proveniente del río Moa, cuyas características se presentan en el anexo 1 tabla 2.1.1 y 2.1.2 las del agua de proceso.
- Agua potable que sale del proceso de potabilización (PA7): agua potable, la materia prima es el agua del río Moa y los materiales auxiliares son los reactivos químicos usados en el tratamiento, así como materiales filtrantes usados en los filtros.
- Base de datos de los parámetros del agua: es el documento donde se recoge el comportamiento diario de los parámetros del agua.

- Programa Statgraphics Centurion XV.II: Programa profesional estadístico que permite hacer análisis y el Excel: Software que permite realizar análisis estadístico.

Los equipos utilizados fueron los siguientes:

- pH-metro, modelo MP 511
- Espectrofotómetro, modelo VE-5000V
- Turbidímetro, marca Merck, modelo Turbiquant 3000T, rango de lectura 0,00–10 000 NTU.
- Conductímetro, modelo 910/8 digital
- Plancha eléctrica, marca: IKA; modelo: C-MAG HP 4
- Cristalería

2.2. Características principales de las materias primas

2.2.1. Características físico-químicas del agua cruda y potable

A continuación, se muestran las tablas 2.2.1 y 2.2.2, con las características físico-químicas del agua cruda y potable del proceso de potabilización, utilizadas en la investigación.

Tabla 2.2.1 Características físico-químicas del agua cruda

Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alcp. mg/L CaCO ₃	AlcT. mg/L CaCO ₃	DT mg/L CaCO ₃	DCa mg/L	DMg mg/L	Cloro mg/L	MO mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. °C
135	21	8,02	2	55	61	3,20	12,72	13,29	3	131	61	25
109	18	8,00	0	56	59	3,20	12,24	13,29	2,8	142	66	25
60	12	8,15	2	71	75	4,80	15,12	15,76	2,1	168	77	25
61	9	8,17	2	71	77	4,80	15,6	15,77	2,0	169	78	26
228	37	8,13	2	63	76	4,80	15,36	15,76	2,0	164	75	25
163	24	8,16	2	65	75	4,80	15,12	15,76	2,0	164	78	25
128	17	8,14	2	73	82	4,72	17,02	15,82	2,5	163	75	25
80	10	8,10	2	74	82	4,39	17,34	15,76	2,3	169	78	25
196	33	8,05	2	60	66	4,77	13,12	13,79	2,2	153	70	23
131	21	8,12	2	58	66	4,78	13,16	14,77	2,3	160	73	24
184	35	8,10	2	59	70	3,98	14,36	14,77	2,4	156	72	24
182	20	8,16	2	63	72	4,76	14,52	15,76	2,1	164	75	25

Tabla 2.2.2 Características del agua potable

Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alcp. mg/L CaCO ₃	AlcT. mg/L CaCO ₃	DT mg/L CaCO ₃	DCa mg/L	DMg mg/L	Cloro mg/L	MO mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. °C
8	2	7,96	0	57	70	4,8	13,92	17,73	1,4	177	82	23
7	1	7,73	0	59	74	6,8	13,68	17,73	1,4	182	84	25
6	1	7,86	0	62	81	6,8	15,36	17,73	1,4	194	90	26
5	0	7,92	0	64	80	6,4	15,36	18,22	1,5	187	86	26
3	0	7,75	0	63	81	6,4	15,6	18,22	1,6	187	86	26
2	0	7,63	0	65	86	6,8	16,56	20,19	1,3	187	86	25
6	0	7,82	0	66	87	6,8	16,8	19,70	1,3	184	84	25
7	0	7,87	0	68	84	6,8	16,08	17,73	1,5	186	86	25
5	0	7,74	0	63	74	6	15,36	18,22	1,4	187	86	24
3	0	7,87	0	63	81	5,2	16,32	17,52	1,5	189	87	24
3	0	7,75	0	61	80	4,8	16,32	17,23	1,5	179	82	25
17	3	7,86	0	61	81	6	15,84	17,23	1,6	182	84	25
40	5	7,97	0	59	81	8,4	14,4	15,26	2	175	81	25

Donde:

- Alcalinidad parcial ----- (ALcP)
- Alcalinidad Total ----- (ALcT)
- Turbidez ----- (Turb.)
- Dureza cálcica ----- (DCa)
- Sólidos totales disueltos --- (STD)
- Dureza magnética ----- (DMg)
- Dureza total ----- (DT)
- Materia orgánica ----- (MO)

A continuación, se describe el proceso de preparación de los reactivos para el proceso de potabilización.

2.2.2. Sistema de preparación de los reactivos

Para la preparación de estos reactivos químicos (Manual de Operaciones, 2016) se crean las condiciones necesarias para que se realice de forma eficiente y con calidad. Se revisa el sistema, previendo que pueda existir algún objeto extraño en

la tolva o en los tanques de preparación.

- **Sulfato de aluminio**

Al tanque de preparación se añade agua hasta alcanzar un nivel de 1,15 m por encima de las paletas del agitador y se pone en funcionamiento. Posteriormente se pesan los sacos de sulfato de aluminio hasta llegar a la cantidad establecida en dependencia de las características del agua cruda y se vierte el producto, mediante la tolva con el objetivo de obtener la concentración deseada en dependencia de la cantidad vertida. El cual debe alcanzar un nivel de 1,45 m y debe agitarse durante un período de 45 minutos con el propósito de lograr una buena homogenización del producto. Se toma una muestra de esta solución y se lleva al laboratorio para realizarle análisis de concentración (Manual de Operaciones, 2016).

- **Sistema de preparación del floculante A-130**

Se añade agua al tanque hasta alcanzar un nivel de 1,40 m por encima de las paletas del agitador y se pone en funcionamiento para agitar. Se añade poco a poco hasta alcanzar un nivel de 1,45 m, esto se hace agitando la solución a una velocidad de < 475 rpm para lograr que se disuelva todo el reactivo, luego se deja añejar por un período de (30 a 60) minutos. Logrado este tiempo de añejamiento del polímero se pasa para el tanque de consumo, alcanzando un nivel de 0,80 m, el mismo se pondrá a dosificar.

- **Sistema de preparación de cal hidratada**

Se añade agua al tanque hasta alcanzar un nivel de 0,30 m y cal hasta llegar a la cantidad establecida en dependencia de las características del agua cruda, luego se añade el producto mediante una tolva con el objetivo de obtener una concentración deseada en dependencia de la cantidad de reactivo añadido al tanque. Al ponerlo en operación se pone a recircular la solución aproximadamente 15 minutos, producto a que este reactivo es poco soluble en agua y en reposo tiende a sedimentarse (Manual de Operaciones, 2016). Luego se toma una muestra de esta solución y se lleva al laboratorio para realizarle análisis de concentración.

- **Cloración**

Actualmente se tiene dos tipos de cloración que son las siguientes:

Cloración primaria: Con un consumo aproximado de 3,5 kg/h. Esta se realiza a la entrada de la planta y se controla en las campanas del filtro de acuerdo a los resultados de la norma de cloro en ese punto. Es muy efectiva para mejorar la coagulación y evitar descomposición de la materia orgánica en los lodos de los sedimentadores, es eficiente también para prevenir el desarrollo de algas y otros compuestos coloreados por oxidación, para mejorar la eficiencia de los filtros al reducir la carga microbiana y especialmente de algas que suelen acumularse en su superficie aumentando los tiempos de filtración.

Cloración secundaria: Con un consumo de 1,5 kg/h aproximado. Esta se realiza a la salida de los filtros, salida de los tanques de reserva y la población, se controla a través de los resultados de las normas de cloro en estos puntos. Además, se hace una cloración en la conductora de agua de la población con el objetivo de lograr una concentración de cloro de (0,8 a 1,00) mg/L. El cloro gaseoso es bastante soluble en agua y normalmente presenta el siguiente equilibrio, ecuaciones 9 y 10:



El ácido hipocloroso (HClO) se ioniza parcialmente:



El grado de ionización depende fundamentalmente del pH y la temperatura, a valores de pH inferiores a siete el ácido hipocloroso se encuentra disociado en un (20 a 30) % en dependencia de la temperatura mientras que a pH ocho el grado de disociación está entre un (70 a 80) %. Los valores de pH de las aguas son tal que normalmente se encuentran en equilibrio tanto el ión hipoclorito como el ácido hipocloroso. El ácido hipocloroso e ión hipoclorito se les denomina cloro libre disponible.

2.2.3. Cálculo de las dosis de sulfato de aluminio

Para esto es necesario conocer:

- Diferencia de niveles de los tanques de consumo (m): N
- Cantidad de sulfato con que se prepara el tanque, kg
- Coeficiente (K), $K=P/V$ útil
P: Peso en kg con que se preparó el tanque de $AL_2(SO_4)_3$, kg
V útil: Volumen útil, m
- Flujo de agua de entrada a la planta m^3/h , Q

$$D_{\text{ópt}} = \Delta N \cdot \frac{K}{Q} \cdot 1\,000 \quad (2.2.1)$$

Esto es válido también para la Cal hidratada, no así para el cloro (Manual de Operaciones, 2016)

2.3 Metodología de experimentación

El estudio del comportamiento de los parámetros del agua, debe su importancia a determinarlas posibles causas que provocan el sobreconsumo de sulfato de aluminio, permitir dictar medidas para corregirlo y reducir los costos económicos.

Los datos reales con los que se desarrolla la investigación están basados en el período de los años 2017 y 2018, los cuales fueron tomados del registro de los Modelos de Análisis Químico (Registro, 2017, 2018) del laboratorio de la planta potabilizadora.

Los parámetros a analizar son los siguientes:

- Consumo del sulfato de aluminio, mg/L
- Color del agua, Pt/Co
- Turbidez, NTU
- pH

- Alcalinidad, mg/LCaCO₃
- Determinación de Calcio y Magnesio, mg/L
- Sólidos totales disueltos, mg/L
- Dureza total, mg/LCaCO₃
- Cloruro, mg/L
- Materia orgánica, mg/L
- Conductividad, (µs/cm²)
- Temperatura, °C

La base de datos se conformó a partir de los análisis químicos realizados por los especialistas en ensayo físico, químico y mecánicos de la Planta Potabilizadora, los cuales se realizaron sobre la base de los procedimientos y normas vigentes en la industria y el país.

Se utilizaron los resultados de dos muestras puntuales del proceso de potabilización una del agua cruda de entrada y otra de agua potable de salida, las cuales fueron sometidas a los siguientes análisis.

2.3.1. Determinación técnica del color

El color en el agua es producto de la presencia de iones metálicos (hierro, manganeso), bromuros, residuales industriales, entre otros.

Dentro del término color se pueden señalar dos clasificaciones:

- Color real: color que presentan las aguas después de eliminar su turbidez y debido a las sustancias en solución disueltas.
- Color aparente: color que presentan las aguas incluyendo tanto el color de las sustancias disueltas como el de la materia suspendida.

El color aparente es el que presenta la materia original, mientras que para la determinación del color real es necesaria la centrifugación de la muestra.

Uno de los métodos para determinar el color es de comparación visual contra patrones de concentración conocida, los cuales son preparados a partir de una

solución de platino y cobalto en forma de ión cloroplatinato y cloruro de cobalto. El valor del color del agua es estimadamente dependiente del pH e invariablemente se incrementa al aumentar el pH de los mismos, por este motivo es necesario cuando se reporta el color, reportar también el pH de la muestra. Además, se puede determinar en un colorímetro. El color de una muestra se debe a la cantidad de materia disuelta en la misma, siempre un agua superficial (de presa) va a tener un valor de color mayor que un agua profunda. Se debe aclarar que el caso del agua de planta de filtro que proviene de presa el color puede aumentar al aplicar un exceso de cloro debido a la concentración de materia orgánica, hierro y manganeso.

2.3.2. Determinación técnica de la turbidez

El método normalizado para la determinación de turbiedad se ha realizado con base en el turbidímetro. Su precisión, sensibilidad y aplicabilidad sobre un rango de turbiedad amplio hace que el método nefelométrico sea preferible a los métodos visuales. El reporte de los resultados de las mediciones se hace como unidades de turbiedad nefelométrica (NTU). El rango de lectura utilizada en el laboratorio se encuentra entre 0 NTU y 10,000 NTU, sin embargo, el intervalo de trabajo va desde 2,0 hasta 1750 NTU. Este método se aplica en este laboratorio para el análisis de todo tipo de aguas y está estandarizado con un intervalo de aplicación entre 2,0 y 8750 NTU.

Para proceder a determinar la turbidez se deja que las muestras lleguen a temperatura ambiente, se agita y se adiciona en una celda perfectamente limpia, se tapa, se purgue y se desecha su contenido. Luego se adicione cuidadosamente la muestra en la celda de tal manera que no forme burbujas y se tapa, se enjuaga, seca y limpia de tal manera que no quede suciedad, ni motas en sus paredes externas. Posteriormente se coloca la celda en el portacelda y se espera la respuesta después de 6 segundos. TP0349

2.3.3. Determinación técnica de pH

Se establece un método para la medición del pH en aguas independientemente de la fuente que la suministra y uso de las mismas. La muestra debe ser representativa, seguidamente se destapa el recipiente que contiene la muestra y antes de tomar muestra para otras determinaciones, se toman 100 mL en un vaso de precipitado y se espera a que la muestra alcance la temperatura del local. Después se lava el electrodo con agua destilada, se seca e introduce en el vaso de precipitado. Se agita (de forma suave) para asegurar la homogeneidad y se espera a que se estabilice la medición y se anota en el registro que corresponda. Los resultados de pH tomados directamente del pH-metro se expresan hasta la centésima. La data se eleva según lo que establecen las normas NC ISO 5725-1 e ISO 5725-2, empleando las pruebas de Cochran y Grubbs, aplicadas para un nivel de confiabilidad de 95 °C (AWWA CF, 1992).

2.3.4. Determinación de alcalinidad

Durante la preparación de las soluciones se utilizan solamente reactivos de grado analítico reconocido y agua de pureza grado tres, según establece la norma ISO 3696.

La muestra se toma, se filtra o centrifuga si contiene materia en suspensión y se toma una porción alícuota de 25mL. En las de agua potable y en las que se sospeche de la presencia de cloro residual se adiciona una gota de solución de tiosulfato de sodio. Se realiza la determinación de la alcalinidad inmediatamente después de pipetear la muestra, ya que puede absorber dióxido de carbono de la atmósfera y puede alterar el resultado de la misma. Luego se adicionan de dos a tres gotas de solución indicadora de fenolftaleína, si se torna de color rosa a rojo se procede a valorar utilizando la solución de ácido sulfúrico hasta la desaparición del color y se anota el valor de los mL de ácido sulfúrico consumidos. Se adiciona a la misma muestra tratada anteriormente de dos a tres gotas de solución del indicador mixto y se continúa la valoración con la solución de ácido sulfúrico,

agitando continuamente hasta que persista el primer cambio de color, de azul a rosado y se anota el valor total del volumen consumido de ácido sulfúrico, que incluyen los mL gastados en la valoración realizada con la fenolftaleína y con el indicador mixto. Si al añadir la fenolftaleína no aparece ninguna coloración en la muestra considere la alcalinidad a la fenolftaleína como cero y la ausencia de iones carbonato.

2.3.5. Determinación técnica de la dureza cálcica y magnésica

Para la determinación de la dureza total se toma una muestra de agua de 25 mL tanto de agua de entrada como de salida. Se le añade dos mL de solución Buffer de amonio pH igual a 10 y una pizca de indicador eriocromo, donde la solución toma una coloración rosado intenso. Luego se valora con E.D.T.A. hasta obtener un color azul con la solución. Luego el valor del volumen del agente valorante se multiplica por el factor 40, para obtener el valor de la dureza total.

Para determinar la dureza cálcica se toma una muestra de agua de 25 mL y se le añade un mL de cromato de potasio. Se valora la solución con nitrato de plata (0,0141 mol/L), la coloración que debe tomar en la valoración es amarillo turbio casi aproximándose al color ladrillo. Obtenido el valor consumido del agente valorante se multiplica por el factor 19,85, para determinar la dureza cálcica.

Para determinar la dureza magnésica se resta el valor consumido para la valoración de la dureza total con la dureza cálcica y este resultado se multiplica por el factor 9,60.

2.3.6. Determinación técnica de los sólidos totales disueltos

Para la determinación de los sólidos totales disueltos se emplea un conductímetro, mediante el cual se obtienen además los valores de conductividad del agua y la temperatura de la misma.

2.3.7. Determinación técnica de la materia orgánica

Para la determinación de la materia orgánica se toma una muestra de 100 mL de agua, se le añade cinco mL de ácido sulfúrico y se pone en la plancha hasta que comienza a ebulir, luego se le añaden diez mL de permanganato de potasio KMNO_4 (0,0125 mol/L). Esta solución se deja reposar por diez minutos y se le añaden diez mL de ácido oxálico (0,0125 mol/L), se agita y toma una coloración incolora. Luego se valora con permanganato de potasio a una temperatura de 70 a 80 °C hasta alcanzar una coloración rosa tenue.

2.3.8. Determinación de conductividad eléctrica

La muestra se toma en recipientes de plástico inertes (polipropileno, polietileno) o vidrio, en porciones de 50 a 100 mL previamente homogenizada. Luego se lava la celda de medición con agua destilada, se endulza con dos o tres porciones de la muestra y se introduce en el vaso del precipitado. Se agita (de forma suave) para asegurar la homogeneidad de la muestra, se espere a que se establezca la medición y se anota en el registro que corresponda. Para las muestras con conductividad superior a 10 mS/cm , se comprueba el instrumento con la solución patrón de 12,88 mS/cm . Los resultados de conductividad, se reportan en $\mu\text{S/cm}$ o mS/cm y se toman directamente de la pantalla del instrumento y se aproximan los resultados hasta la centésima (AWWA CF, 1992).

Los resultados obtenidos son tratados por métodos estadísticos y analizados tecnológicamente, para ello se utilizó el Excel y el software Statgraphics Centurion XV. II que está diseñado para construir un modelo estadístico describiendo el impacto de dos o más factores categóricos X_j de una variable dependiente Y . Se realizan pruebas para determinar si hay o no diferencias significativas entre las medias a diferentes niveles de los factores y si hay o no interacciones entre los factores.

2.4. Metodología estadística

Confección de una base de datos a partir de los análisis del agua, cuyo parámetro dependiente respecto al agua de entrada es el consumo de sulfato de aluminio y respecto a la de salida es independiente, en el proceso de potabilización de la misma, el cual se controla sistemáticamente.

2.4.1 Prueba de hipótesis sobre las medias de dos distribuciones con muestras pareadas

Cuando las observaciones son tomadas en pares (Delgado, 1990), donde cada par es sometido a idénticas condiciones experimentales, variando las condiciones de par a par, se dice que se han tomado observaciones pareadas a muestras pareadas. De cada par (X_i, Y_i) se calcula $d_i = X_i - Y_i$.

Se asume, en este caso, que las d_i se distribuyen según la normal, con una media común y desconocida μ_d y con una varianza común, también desconocida $(\sigma_d)^2$. Esto es garantizado cuando se asume que todas las X_i y Y_i son normales e independiente; en cada par, los valores medios de X_i y Y_i difieren en una constante independiente de i , $(\sigma_x)^2$ y $(\sigma_y)^2$ son las varianzas de X_i y Y_i respectivamente, para todo i .

Realizar la prueba a la igualdad de las medias μ_x y μ_y , es equivalente a realizar la prueba de hipótesis de que $\mu_d = 0$, cuando la desviación estándar es desconocida, y bajo las suposiciones efectuadas.

Para muestra aleatoria simple de diferencias (d_1, \dots, d_n) se emplea el estadigráfico, ecuaciones (2.4.1), (2.4.2), (2.4.3) y (2.4.4).

$$t = \frac{\bar{d} \cdot \sqrt{n}}{S_d} \quad (2.4.1)$$

Donde:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \text{ y } S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \quad (2.4.2)$$

La región crítica para pruebas de dos colas:

$$|t| \geq t_{\alpha/2; n-1} \quad (2.4.3)$$

Y para pruebas de una cola:

$$t > t_{\alpha; n-1} \text{ y } t < -t_{\alpha; n-1} \quad (2.4.4)$$

2.4.2. Correlación y regresión

El análisis de correlación (Delgado, 1990) es la técnica que permite medir el grado de asociación entre dos o más variables a través del coeficiente de correlación o del coeficiente de determinación, es la antesala al análisis de regresión.

El análisis de regresión es una técnica estadística que se puede utilizar para desarrollar una ecuación matemática que muestre cómo se relacionan las variables. En la terminología de regresión, la variable a predecir se llama variable dependiente o de respuesta.

Existen dos formas de aplicar el análisis de regresión múltiple una es el método paso a paso hacia adelante y la otra es el método paso a paso hacia atrás, la primera consiste en ir agregando variables independientes al modelo de regresión y la segunda es suponer que todas las variables independientes son significativas e ir eliminando aquellas que no cumplan con las especificaciones del modelo.

El método utilizado en el análisis de regresión es el de los Mínimos Cuadrados, técnica de análisis numérico enmarcada dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares ordenados variable independiente, variable dependiente y una familia de funciones, se intenta encontrar la función continua, dentro de dicha familia, que mejor se aproxime a los datos (un "mejor ajuste"), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático. En su forma más simple, intenta minimizar la suma de cuadrados de las diferencias en las ordenadas (llamadas residuos) entre los puntos generados por la función elegida y los correspondientes valores en los datos. Específicamente, se llama mínimos cuadrados promedio (LMS) cuando el número de datos medidos es uno y se usa el método de descenso por gradiente para minimizar el residuo cuadrado.

Es importante que los datos a procesar estén bien escogidos, para que permitan visibilidad en las variables que han de ser resueltas. La técnica de mínimos cuadrados se usa comúnmente en el ajuste de curvas.

Para la obtención de los modelos matemáticos por el método del mínimo cuadrado, se utilizó el Software Statgraphics Centurion XV. II y el Excel.

Conclusión Capítulo 2

En este capítulo se describieron los materiales y métodos empleados en la investigación, así como el análisis experimentalmente cada uno de los parámetros del agua a tener en cuenta y se describió la metodología para el estudio estadístico mediante métodos de correlación y regresión, con el empleo del método de regresión paso a paso atrás-

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los principales resultados de la investigación, así como el análisis estadístico realizado a cada una de las variables de estudio, las posibles causas que provocan el incremento del consumo de sulfato de aluminio y medidas para mejorar la eficiencia del proceso de potabilización.

3.1 Análisis de las características físico-químicas del agua en relación con el consumo de sulfato de aluminio

En las tablas 3.1.1 y 3.1.2. se expresan una parte de los resultados de los parámetros de la toma de muestras del agua, tanto de entrada como de salida del proceso respectivamente durante el período de los años 2017 y 2018.(Anexo 3)(Tablas 3.1.3 y 3.1.4)

Tabla 3.1.1 Características física-químicas del agua de entrada en relación con el consumo de sulfato de aluminio

Fecha	Agua cruda (2017-2018)										
	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alcp. mg/L CaCO ₃	AlcT. mg/L CaCO ₃	DT mg/L CaCO ₃	Cloro mg/L	MO mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L
15-dic	17,36	282	45	7,97	0	54	57	13,79	2,10	141	65
24-dic	23,56	90	12	8,05	2	65	69	13,79	2,00	163	75
29-dic	51,89	194	31	8,05	2	60	66	14,77	2,30	140	65
8-ene	42,66	994	932	7,29	0	30	34	8,86	2,70	47	182
10-ene	36,83	467	76	7,57	0	46	53	12,31	2,40	125	58
20-ene	28,49	807	137	7,53	0	43	48	14,15	2,30	101	46
27-ene	26,38	227	35	7,93	0	71	73	15,70	2,30	159	73

Tabla 3.1.2 Características física-químicas del agua de salida en relación con el consumo de sulfato de aluminio

Fecha	Agua de salida (2017-2018)										
	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alcp. mg/L CaCO ₃	AlcT. mg/L CaCO ₃	DT mg/L CaCO ₃	Cloro mg/L	MO mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L
15-dic	17,36	1	0	7,82	0	51	64	17,73	1,2	163	74
24-dic	23,56	2	0	7,55	0	62	73	15,76	1,4	173	80
29-dic	51,89	3	0	7,95	0	55	74	17,23	1,4	165	76
8-ene	42,66	1	1,0	7,42	0	40	44	14,22	1,7	99	38
10-ene	36,83	6	0	7,63	0	48	76	16,14	2,1	170	78
20-ene	28,49	3	0	7,59	0	39	63	16,60	1,8	129	59
27-ene	26,38	3	0	7,94	0	66	84	18,15	1,7	180	83

Se realizó una base de datos del promedio mensual en los años 2017 y 2018, del consumo de sulfato de aluminio y los parámetros del agua de entrada y de salida, los cuales se ven reflejados en las tablas 3.1.5 y 3.1.6, respectivamente.

Tabla 3.1.5 Reporte del consumo de sulfato de aluminio y de los parámetros del agua cruda de entrada en los años 2017 y 2018

Meses	Consumo de Sulfato de Aluminio mg/L	Color Pt/Co	Turb. NTU	Ac. Parcial mg/L CaCO ₃	Alc. Total mg/L CaCO ₃	Dureza Total mg/L CaCO ₃	Materia Orgánica mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L
ene-17	14,68	103,31	29,43	1,76	62,83	79,66	1,90	166,38	69,24
feb-17	16,23	70,49	12,54	1,89	65,78	81,57	1,84	165,63	71,78
mar-17	18,46	204,00	32,54	1,64	58,68	76,67	2,04	165,08	68,27
abr-17	23,08	196,82	34,99	1,57	55,62	81,92	1,66	161,70	75,05
may-17	19,52	69,76	12,09	2,47	71,50	101,54	1,62	179,11	77,24
jun-17	13,14	55,90	10,00	3,18	73,03	105,16	1,71	188,33	72,03
jul-17	22,68	86,10	17,36	2,50	72,05	106,20	1,87	185,26	80,89
ago-17	15,76	67,18	11,36	3,35	72,78	83,34	1,98	19,50	83,00
sep-17	17,68	138,01	16,39	2,17	65,00	81,61	2,14	181,61	76,57
oct-17	21,73	182,00	32,72	1,72	65,94	78,44	2,18	180,30	75,80
nov-17	20,32	153,85	31,58	0,76	58,84	75,88	1,99	173,68	79,95
dic-17	21,47	137,25	51,48	1,04	57,49	69,40	2,11	180,56	70,17
ene-18	26,51	316,94	68,94	0,33	56,13	77,80	2,03	170,16	75,87
feb-18	20,47	298,63	52,87	0,45	56,68	78,10	1,99	174,14	65,76
mar-18	17,71	200,00	33,30	0,33	58,75	76,60	2,05	178,14	68,84
abr-18	13,69	196,80	7,17	1,28	62,55	88,97	1,57	168,65	70,00
may-18	25,87	390,80	27,85	0,44	56,21	76,06	1,91	177,20	89,73
jun-18	12,67	101,25	16,75	2,48	72,31	83,36	1,72	186,68	65,14
jul-18	13,29	110,75	19,50	3,32	74,66	81,82	1,93	184,52	75,00
ago-18	12,08	84,79	27,19	2,15	78,03	80,15	1,80	181,95	86,56
sep-18	15,71	138,01	29,71	1,96	75,49	87,64	1,82	188,07	70,00

Tabla 3.1.6 Reporte del consumo de sulfato de aluminio y de los parámetros del agua potable de salida en los años 2017 y 2018

Meses	Consumo de Sulfato de Aluminio mg/L	Color Pt/Co	Turb. NTU	Ac. Parcial mg/L CaCO ₃	Alc. Total mg/L CaCO ₃	Dureza Total mg/L CaCO ₃	Materia Orgánica mg/L	Conduc. (μs/cm ²)	STD mg/L
ene-17	14,68	2,71	0,00	0,00	51,00	64,66	1,20	163,38	76,56
feb-17	16,23	2,53	0,00	0,00	62,00	73,57	1,04	173,63	76,22
mar-17	18,46	2,65	0,06	0,00	61,00	76,67	1,30	183,08	81,37
abr-17	23,08	2,15	0,15	0,00	55,00	74,92	1,40	165,70	74,24
may-17	19,52	2,00	0,18	0,00	52,00	77,54	1,42	167,11	82,44
jun-17	13,14	2,63	0,09	0,00	40,00	44,16	1,71	99,33	94,14
jul-17	22,68	2,63	0,00	0,00	37,00	72,20	2,70	176,26	94,14
ago-17	15,76	2,11	0,00	0,00	48,00	76,34	2,10	170,50	89,47
sep-17	17,68	4,87	1,01	0,00	39,00	63,61	1,80	129,61	83,58
oct-17	21,73	4,56	1,05	0,00	47,00	66,44	2,18	138,30	82,84
nov-17	20,32	2,78	1,50	0,00	59,00	66,88	1,99	153,68	80,05
dic-17	21,47	2,25	0,60	0,00	51,00	62,40	2,11	161,56	92,85
ene-18	26,51	3,27	0,21	0,00	66,00	84,80	2,03	180,16	89,23
feb-18	20,47	2,88	0,18	0,00	51,00	78,10	1,99	172,14	90,22
mar-18	17,71	1,85	1,00	0,00	47,00	68,60	2,05	161,14	94,28
abr-18	13,69	1,77	0,03	0,00	60,00	88,97	1,47	173,65	77,55
may-18	25,87	4,56	0,40	0,00	56,21	83,06	1,41	161,20	93,45
jun-18	12,67	2,26	0,00	0,00	58,00	75,36	1,25	172,68	86,49
jul-18	13,29	1,80	0,01	0,00	63,00	81,82	1,33	155,52	84,82
ago-18	12,08	1,79	0,52	0,00	68,03	82,15	1,30	156,95	83,68
sep-18	15,71	1,74	0,81	0,00	46,00	68,64	1,40	147,07	86,47

3.2. Análisis estadístico de los resultados experimentales

Las investigaciones precedentes sobre el proceso de potabilización del agua en relación con el sulfato de aluminio, han estado dirigidas a estudiar el comportamiento de los parámetros del agua de entrada y salida del proceso de manera independiente y la combinación de algunos de ellos.

Para los experimentos realizados se obtuvieron los resultados estadísticos siguientes:

3.2.1. Comportamiento de los parámetros del agua en relación con el consumo de sulfato de aluminio

Para el análisis del comportamiento de los parámetros del agua de entrada del proceso de potabilización en relación con el consumo de sulfato de aluminio, para los años 2017 y 2018 se utilizó la tabla 3.1.5.

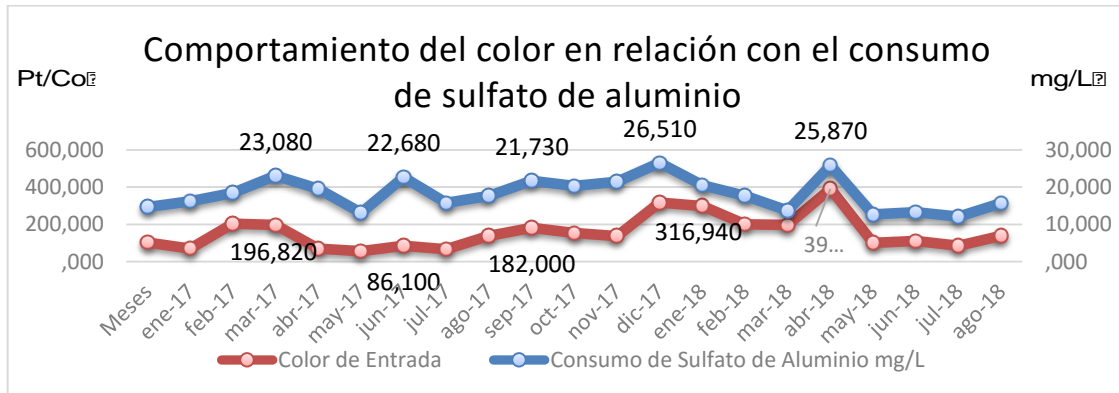


Figura 3.2.1. Consumo de sulfato de aluminio vs color de entrada

En la figura 3.2.1 se observa, que a medida que aumentan los valores del color de entrada del agua ocurre un aumento del consumo de sulfato de aluminio, o sea que existe una relación entre ambas variables.

En cuanto al comportamiento de la turbidez (Figura 3.2.2) se observa una relación semejante al del color, o sea que ambas variables aumentan consecutivamente.

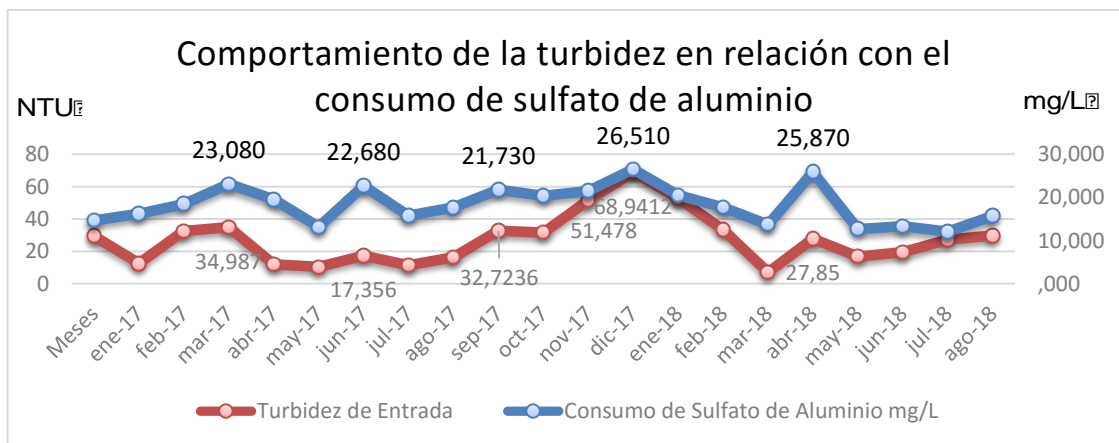


Figura 3.2.2. Consumo de sulfato de aluminio vs turbidez de entrada

Al analizar la alcalinidad del agua, tanto parcial (Figura 3.2.3) como total (Figura 3.2.4) en relación con el consumo de sulfato de aluminio, se observa una variabilidad, o sea que no depende del mismo.

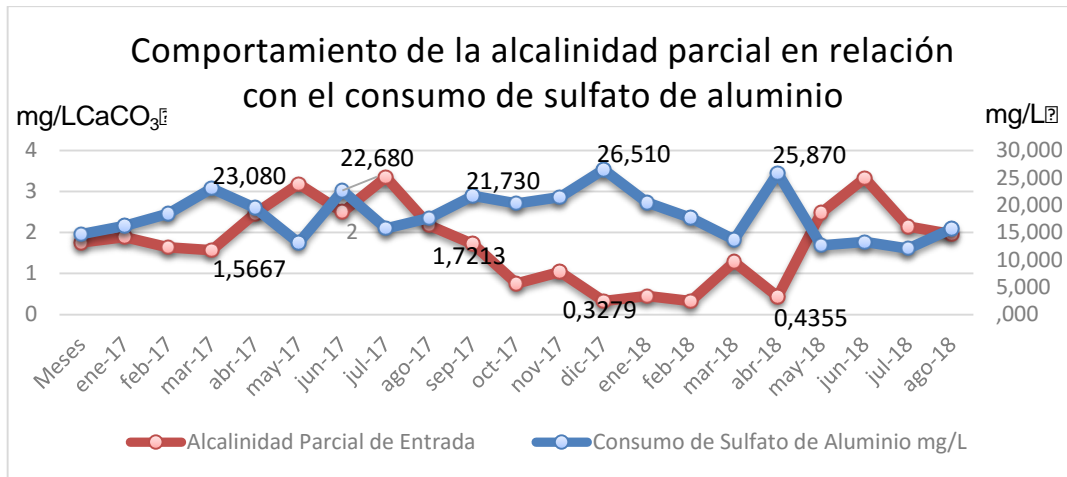


Figura 3.2.3. Consumo de sulfato de aluminio vs alcalinidad parcial de entrada

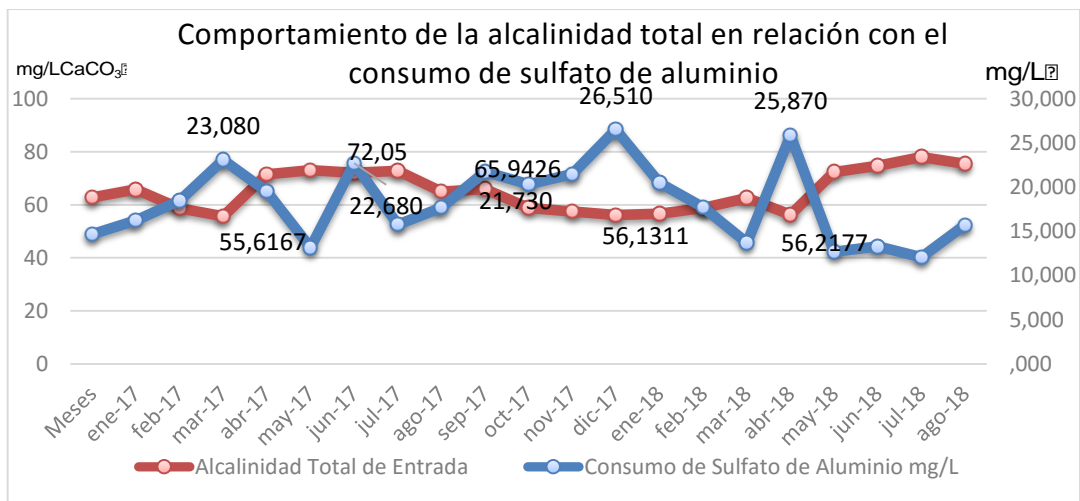


Figura 3.2.4. Consumo de sulfato de aluminio vs alcalinidad total de entrada

En la siguiente figura (3.2.5) se realiza una comparación en relación con la dureza total del agua, donde se observa que no existe relación alguna entre ambas variables.

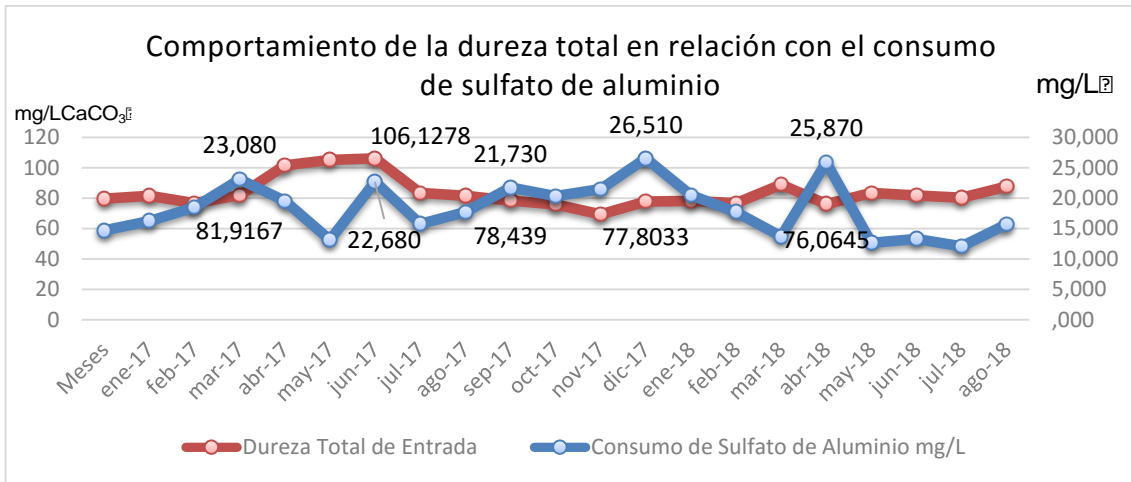


Figura 3.2.5 Consumo de sulfato de aluminio vs dureza total de entrada

Al relacionarse con la materia orgánica (Figura 3.2.6) y conductividad (Figura 3.2.7) se observa poca variación, o sea que no tienen un comportamiento semejante al del consumo de sulfato de aluminio.

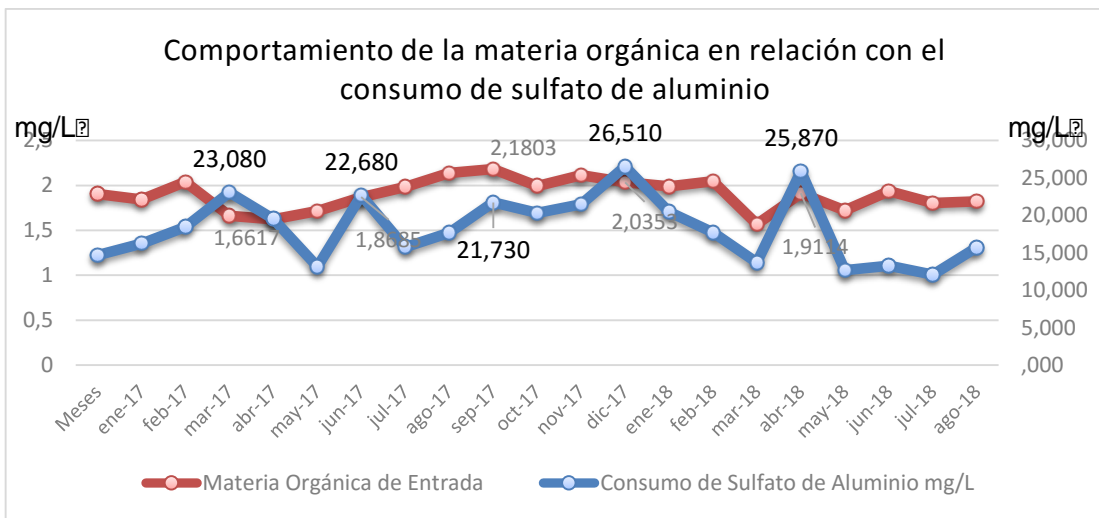


Figura 3.2.6 Consumo de sulfato de aluminio vs materia orgánica de entrada

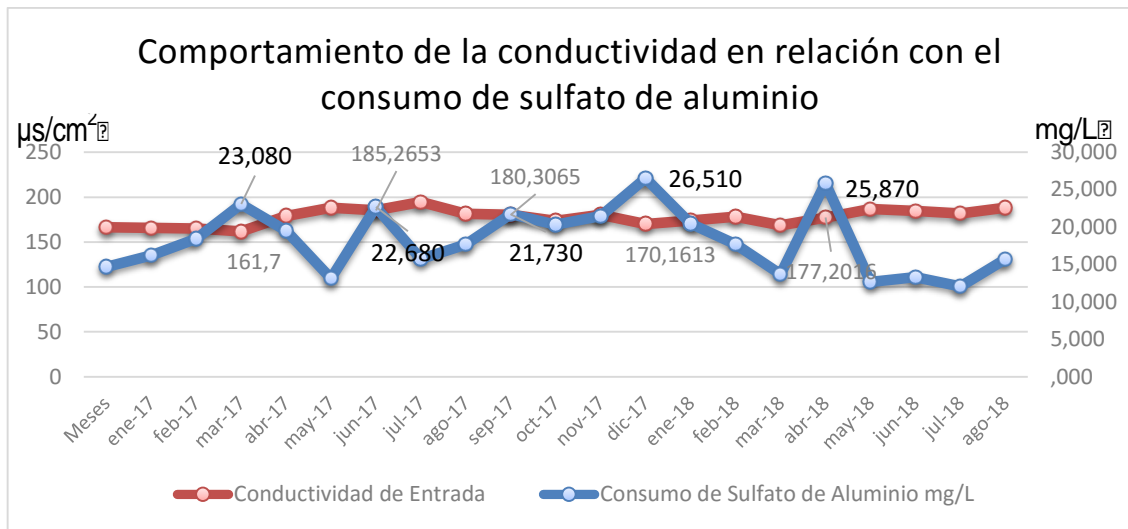


Figura3.2.7 Consumo de sulfato de aluminio vs conductividad de entrada

Al tener en cuenta el comportamiento de los sólidos totales disueltos(Figura3.2.8) se observa una variación semejante en algunos picos, por lo que puede ser significativa en relación con el consumo de sulfato de aluminio.

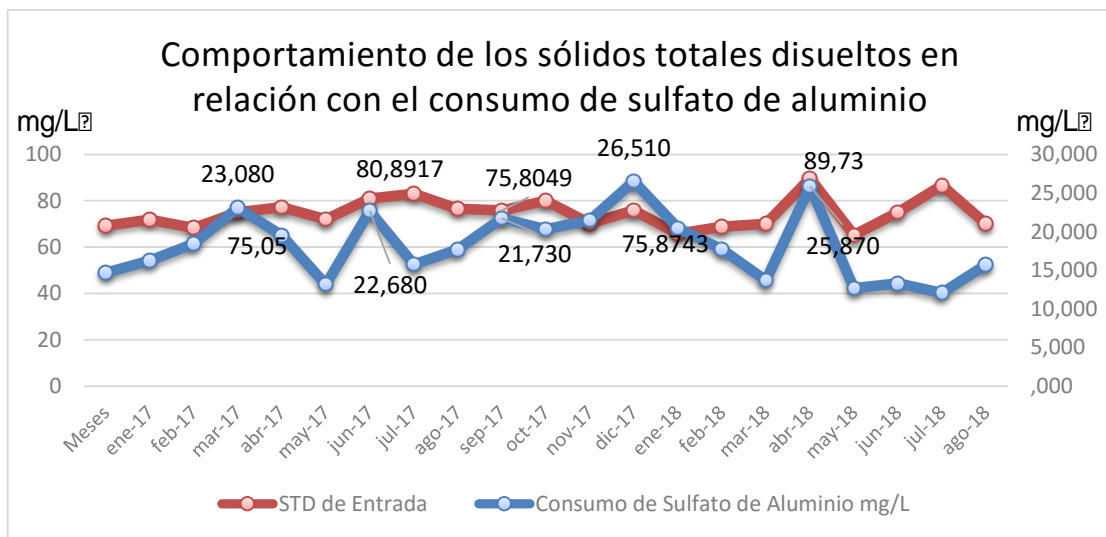


Figura3.2.8 Consumo de sulfato de aluminio vs los sólidos totales disueltos de entrada

Al realizar el comportamiento de las variables a tomar en cuenta en la investigación se observa una variación semejante para el color y la turbidez del

agua en relación con el consumo de sulfato de aluminio. Para dar validez a la observación visual se realiza a continuación el método de regresión paso a paso hacia atrás teniendo en cuenta todas las variables en estudio.

3.2.2. Método de regresión paso a paso hacia atrás

Se aplicó el método de regresión paso a paso hacia atrás para determinar que variables influyen en la determinación del consumo de sulfato de aluminio. Se pueden asumir que los modelos de regresión simple en expresión del consumo de sulfato de aluminio con cada una de las variables independientes son significativos, sin embargo, la correlación entre el consumo de sulfato de aluminio y las demás variables son débiles a excepción del color, la alcalinidad total y la dureza total, o sea son moderadas. Teniendo en cuenta todo lo anterior la mejor estimación para el consumo de sulfato de aluminio sería su media.

Aplicando la técnica de regresión paso a paso hacia atrás (se asumen que todas las variables son significativas) se obtiene un coeficiente de correlación múltiple de 68,89 % y un coeficiente de determinación de 47,459 % (Tabla 3.2.1), sin embargo, la prueba de t-student para los coeficientes de correlación arrojan que las variables que son significativas en la determinación del consumo de sulfato de aluminio, son el color, la turbidez y los sólidos totales disueltos (Tabla 3.2.2).

Tabla 3.2.1 Estadísticas de la regresión en función de todos los parámetros del agua a analizar

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,68890761
Coeficiente de determinación R ²	0,47459369
R ² ajustado	0,44237538
Error típico	7,87576909

Tabla 3.2.2 Estadístico t y probabilidad del consumo del sulfato de aluminio en función de los parámetros del agua.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	52,99	36,08	1,47	0,14	-18,14	124,12
Color	0,03	0,01	4,16	0,00	0,02	0,05
Turbidez	-0,14	0,04	-3,45	0,00	-0,22	-0,06
pH	-4,51	3,75	-1,20	0,23	-11,90	2,87
Alcalinidad Parcial	-1,41	0,74	-1,91	0,06	-2,87	0,04
Alcalinidad Total	-0,26	0,13	-1,98	0,05	-0,51	0,00
Dureza Total (DT)	-0,27	0,17	-1,56	0,12	-0,61	0,07
Cloro	-0,24	0,60	-0,40	0,69	-1,42	0,94
Materia Orgánica	-3,18	1,96	-1,62	0,11	-7,04	0,68
Conductividad	-0,25	0,11	-2,28	0,02	-0,47	-0,03
Sólidos Totales Disueltos	0,64	0,21	3,13	0,00	0,24	1,05
Temperatura	1,71	0,52	3,26	0,00	0,68	2,75

Se aplicó nuevamente el método de regresión múltiple con las variables color, turbidez y sólidos totales disueltos (Tabla 3.2.4):

Tabla 3.2.3 Estadística de la regresión en función del color, turbidez y STD

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,56320554
Coefficiente de determinación R ²	0,31720048
R ² ajustado	0,30797346
Error típico	8,77371212

Tabla 3.2.4 Estadístico t y probabilidad del consumo de sulfato de aluminio en función del color, turbidez y STD

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>
Intercepción	17,95	8,13	2,21	0,03	1,93
Color	0,02	0,01	3,26	0,00	0,01
Turbidez	-0,01	0,02	-0,35	0,73	-0,05
Sólidos Totales Disueltos (STD)	0,02	0,11	0,23	0,82	-0,18

Donde se evidenció que el coeficiente de correlación disminuye, producto a que se eliminaron algunas variables del modelo. Además, se determinó que el color es la única variable que puede influir en la determinación del consumo de sulfato de aluminio. Teniendo en cuenta las variables a analizar, se realizó una prueba con las variables color y turbidez, demostrando que sigue siendo significativo el color (Tabla 3.2.6):

Tabla 3.2.5 Estadística de la regresión en función del color y la turbidez

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,56305779
Coeficiente de determinación R ²	0,31703407
R ² ajustado	0,31090882
Error típico	8,75508467

Tabla 3.2.6 Estadístico t y probabilidad del consumo del sulfato de aluminio en función del color y la turbidez

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	19,83	0,76	26,02	0,00	18,33	21,34
Color	0,02	0,00	6,66	0,00	0,01	0,02
Turbidez	0,00	0,01	-0,28	0,78	-0,03	0,02

Luego se realizó la prueba en función de las variables turbidez y sólidos totales disueltos, teniendo en cuenta que estas variables, (Tabla 3.2.2), son significativas.

Tabla 3.2.7 Estadística de la regresión en función de la turbidez y STD

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,53335932
Coeficiente de determinación R ²	0,28447216
R ² ajustado	0,27805487
Error típico	8,96136362

Tabla 3.2.8 Estadístico t y probabilidad del consumo de sulfato de aluminio en función de la turbidez y STD

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	41,93	3,55	11,80	0,00	34,92	48,93
Turbidez	0,06	0,01	7,64	0,00	0,04	0,07
Sólidos Totales Disueltos (STD)	-0,28	0,05	-5,67	0,00	-0,38	-0,18

En este caso ambas variables son significativas en relación con el consumo de sulfato de aluminio (Tabla 3.2.8).

Primeramente, se determinó que el color fue la más significativa, combinando ambas variables. Al realizar la prueba con la turbidez y los STD, se determinó que las dos son significativas, como que en este caso son dos variables y conociendo que la turbidez depende del color (Figura 3.2.9), el modelo se determinó teniendo en cuenta estas últimas.

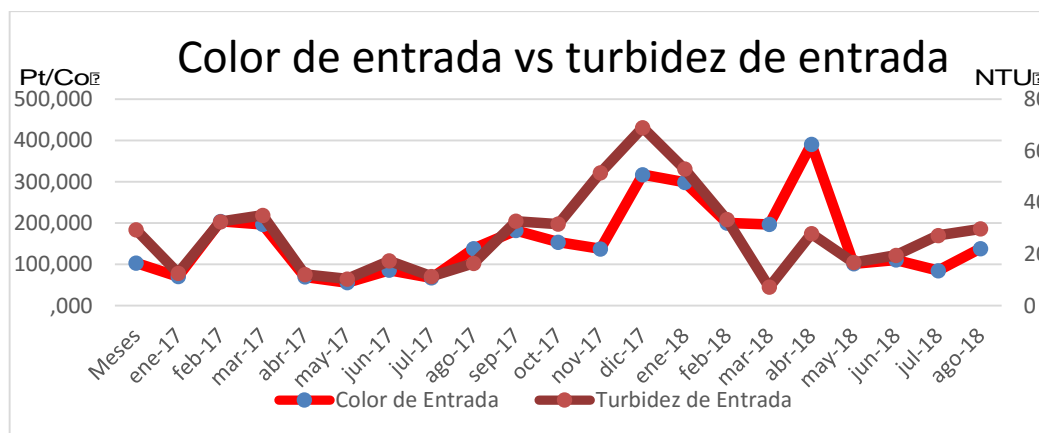


Figura 3.2.9 Comportamiento del color vs turbidez de entrada

3.2.3. Obtención del modelo matemático- estadístico

Se determinó el siguiente modelo teniendo en cuenta las variables significativas (ecuación 3.2.1) en función del consumo del sulfato de aluminio:

$$\text{Consumo}_{Al_2(SO_4)_3} = 41,93 + 0,056 \cdot \text{Turbidez} - 0,283 \cdot \text{STD} \quad (3.2.1)$$

R-Cuadrada= 28,4472 porciento

R-Cuadrado (ajustado)=27,8055 porciento

Error estándar del estimado=8,96136

Error absoluto medio=6,18263

Estadístico Durbin-Watson=0,7159 (P=0,0000)

Autocorrelación de residuos en retraso 1=0,641043

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 28,4472% de la variabilidad en consumo del sulfato de aluminio. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 27,8055%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 8,96136. El error absoluto medio (MAE) de 6,18263 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

En la figura 3.2.10 se muestra la correlación que existe del consumo del sulfato de aluminio en función de las variables más significativas.

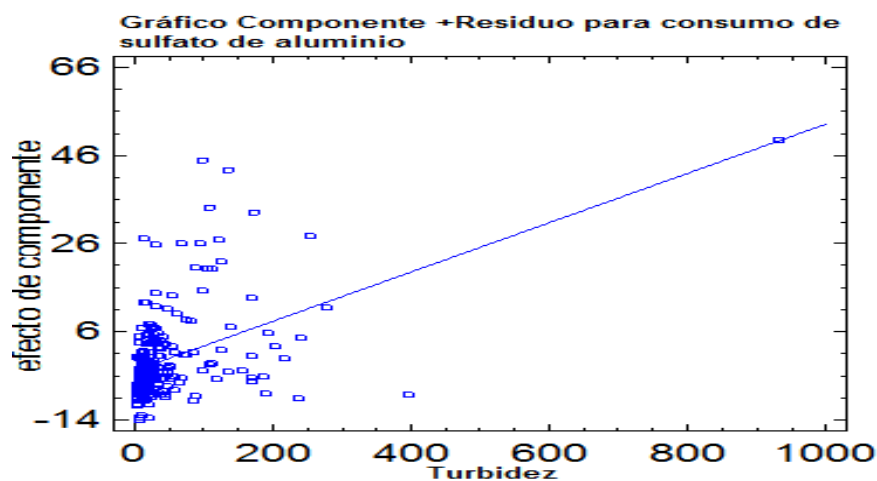


Figura 3.2.10. Correlación del consumo de sulfato con las variables más significativas.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, se nota que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0000, que corresponde a los sólidos totales disueltos (STD). Puesto que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%.

3.2.3.1 Análisis comparativo del consumo de sulfato de aluminio real y por el modelo matemático

A partir de los valores reales de turbidez y sólidos totales disueltos de las tablas 3.1.3 y 3.1.4 (Anexo 2) y el modelo matemático se calculó la dosis óptima media de consumo de sulfato de aluminio para diferentes rangos de turbidez (Tabla 3.2.9), corroborando que la dosis añadida al proceso en la actualidad es superior a la determinada con el modelo.

Tabla 3.2.9 Dosis óptima media de consumo de sulfato de aluminio por el modelo obtenido para rangos de turbidez

Rango	Modelo	Real
<40	21,418	26,883
41-80	24,330	31,500
81-120	26,996	41,893
>120	36,454	57,648

En la figura 3.2.11 se realiza una comparación entre los valores con las medias reales y la obtenida por el modelo, donde se observa una regularidad en ambos comportamientos, sin embargo, en todos los casos el consumo de sulfato de aluminio dado por el modelo tienen valores menores que el real.

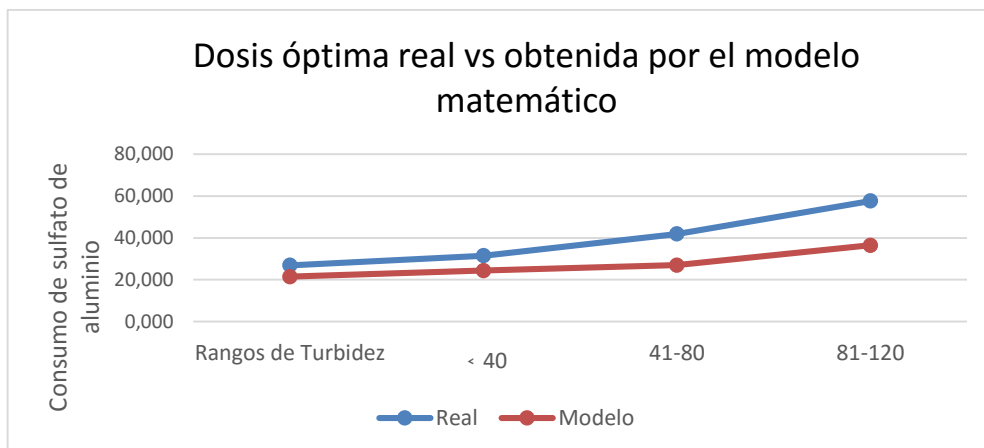


Figura 3.2.11

3.2.4 Prueba de hipótesis sobre la media de muestras pareadas

Se realizó una prueba de hipótesis sobre las medias de muestras pareadas (prueba t-student), a los parámetros fundamentales a analizar, para determinar si la cantidad de sulfato aplicada mejora o no las propiedades del agua y se realizaron gráficos para una temporada de varios meses tomando la media mensual (tablas 3.1.5 y 3.1.6).

Color

En la tabla 3.2.10 se muestra la prueba de hipótesis para el color:

Tabla 3.2.10 Prueba de hipótesis para el color

	<i>Entrada</i>	<i>Salida</i>
Media	274,2611	4,6814
Varianza	107011,5715	55,6225
Coeficiente de correlación de Pearson	0,1834	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	225,0000	
Estadístico t	12,4376	
P(T<=t) una cola	0,0000	
Valor crítico de t (una cola)	1,6517	
P(T<=t) dos colas	0,0000	
Valor crítico de t (dos colas)	1,9706	

Donde se determinó que las probabilidades, tanto para la prueba de dos colas como para la de una cola, son cercanas a cero por tanto hay una disminución significativa en los valores del color del agua (Figura3.2.12).

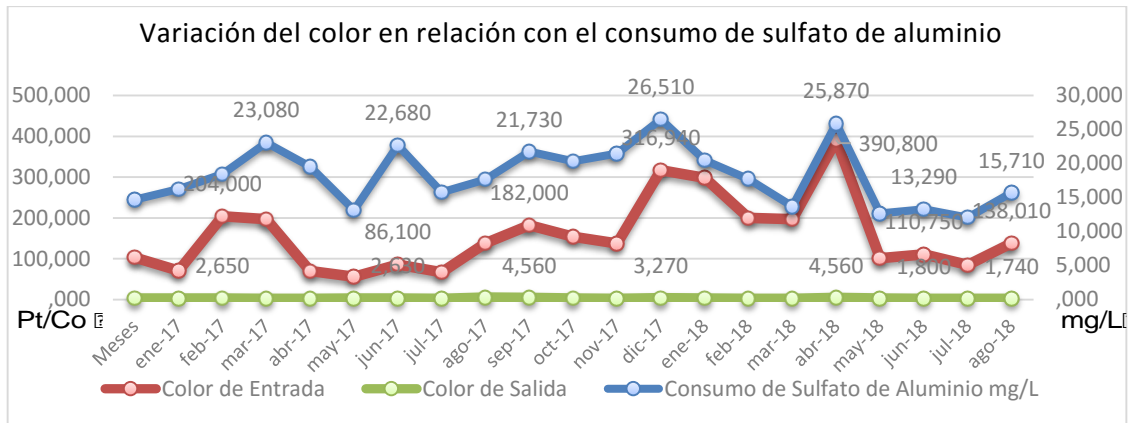


Figura3.2.12 Variación del color en relación con el consumo de sulfato de aluminio

En el figura 3.2.12 se demuestra que a mayor unidades de color para el agua de entrada hay un mayor consumo de sulfato de aluminio, sin embargo en el agua de salida se logra una disminución del color y una estabilidad, que es lo requerido para garantizar la calidad del agua, lo que queda demostrado a partir de la prueba de hipótesis realizada para este parámetro, tabla 3.2.10.

Turbidez

En la tabla 3.2.11 se muestra la prueba de hipótesis para la turbidez:

Tabla 3.2.11 Prueba de hipótesis para la turbidez

	Entrada	Salida
Media	48,6363	0,3569
Varianza	6719,8211	1,2508
Coeficiente de correlación de Pearson	0,1557	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	225,0000	
Estadístico t	8,8720	
P(T<=t) una cola	0,0000	
Valor crítico de t (una cola)	1,6517	
P(T<=t) dos colas	0,0000	
Valor crítico de t (dos colas)	1,9706	

Donde se determinó que las probabilidades, tanto para la prueba de dos colas como para la de una cola, son cercana a cero por tanto hay una disminución significativa en los valores de turbidez del agua (Figura 3.2.13), o sea que mejora logrando una estabilidad en los valores de salida siendo cercanos a cero.

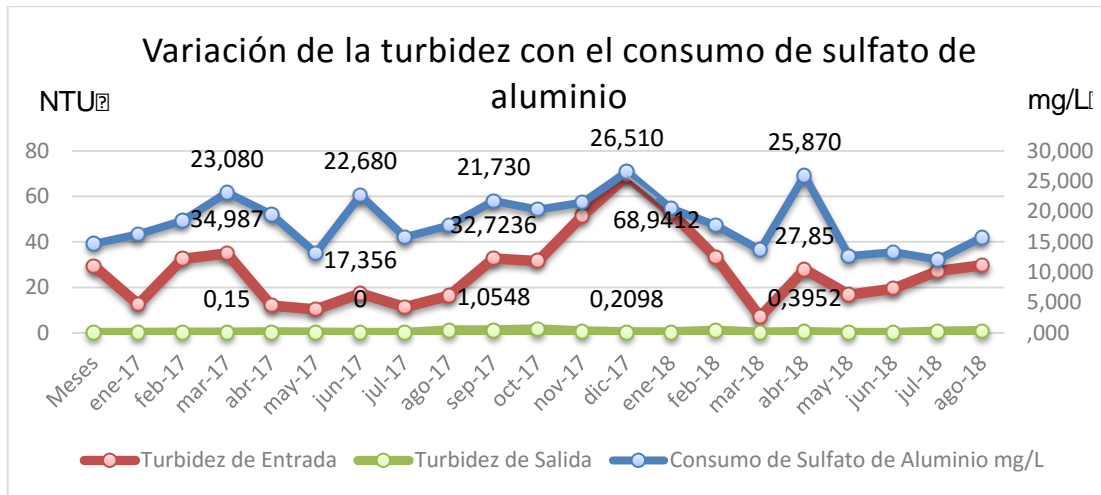


Figura 3.2.13. Variación de la turbidez en relación con el consumo de sulfato de aluminio

Sólidos Totales Disueltos

En la tabla 3.2.12 se muestra la prueba de hipótesis para los sólidos totales disueltos:

Tabla 3.2.12 Prueba de hipótesis para los sólidos totales disueltos

	Entrada	Salida
Media	69,9381	80,1593
Varianza	143,0806	64,6412
Observaciones	226,0000	226,0000
Coefficiente de correlación de Pearson	0,2769	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	225,0000	
Estadístico t	-12,3638	
P(T<=t) una cola	0,0000	
Valor crítico de t (una cola)	1,6517	
P(T<=t) dos colas	0,0000	
Valor crítico de t (dos colas)	1,9706	

Donde se determinó que las probabilidades, tanto para la prueba de dos colas como para la de una cola, son cercanas a cero. Hay un aumento, significativo en los valores de los sólidos totales disueltos en el agua (Figura 3.2.14), lo que no es favorable para el proceso.

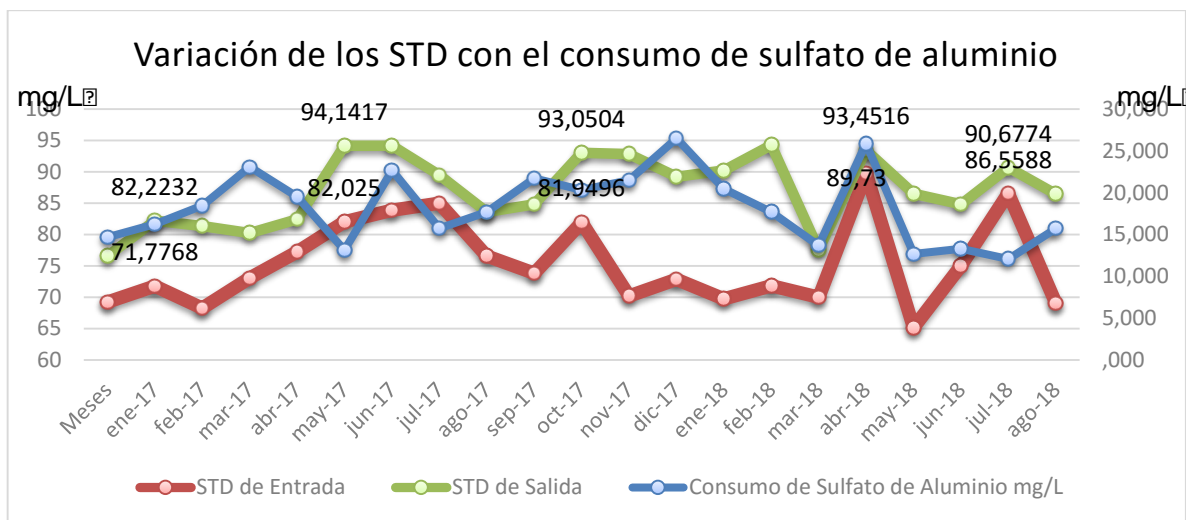


Gráfico 3.2.14. Variación de los sólidos totales disueltos en relación con el consumo de sulfato de aluminio

3.3. Normativa de los parámetros de salida del agua y consumo de sulfato de aluminio

A continuación, se muestra en la tabla 3.3.1 la norma para cada uno de los parámetros del agua significativos para el proceso:

Tabla 3.3.1 Norma de los parámetros del agua

Meses	Color	Norma	Turb.	Norma	STD	Norma	Temp.	Sulfato de aluminio (mg/l)	Norma
ene-17	2,7097	15	0,0000	5	76,5565	500	22,6774	14,6800	20
feb-17	2,5268	15	0,0000	5	76,2232	500	23,3929	16,2300	20
mar-17	2,6504	15	0,0600	5	81,3659	500	22,8374	18,4600	20
abr-17	2,1500	15	0,1500	5	74,2417	500	23,0833	20,0760	20
may-17	2,0000	15	0,1800	5	82,4355	500	24,1129	19,5200	20
jun-17	2,6306	15	0,0900	5	94,1417	500	25,2500	13,1400	20
jul-17	2,6306	15	0,0000	5	94,1417	500	25,2500	19,6800	20

ago-17	2,1129	15	0,0000	5	89,4677	500	25,2984	15,7600	20
sep-17	4,8689	15	1,0132	5	83,5847	500	25,0339	17,6824	20
oct-17	4,5565	15	1,0548	5	82,8387	500	25,0323	21,7262	20
nov-17	2,7815	15	1,5000	5	80,0504	500	24,3697	20,3200	20
dic-17	2,2500	15	0,6000	5	92,8458	500	67,1736	21,4720	20
ene-18	3,2705	15	0,2098	5	89,2258	500	23,3387	26,5100	20
feb-18	2,8800	15	0,1800	5	90,2200	500	25,2000	14,4728	20
mar-18	1,8500	15	1,0000	5	94,2800	500	24,6000	17,7118	20
abr-18	1,7750	15	0,0333	5	77,5583	500	24,6417	13,6900	20
may-18	4,5645	15	0,3952	5	93,4516	500	25,4274	25,8700	20
jun-18	2,2583	15	0,0000	5	86,4868	500	26,7632	12,6700	20
jul-18	1,7984	15	0,0081	5	84,8226	500	26,5323	13,2900	20
ago-18	1,7900	15	0,5200	5	83,6774	500	26,5565	12,0800	20
sep-18	1,7400	15	0,8077	5	86,4706	150	26,3725	15,7100	20

En las figuras 3.3.1-3.3.2-3.3.3 se observa el color, turbidez y sólidos totales disueltos de salida del agua vs la norma, consecutivamente, los cuales cumplen los requisitos de normativa del agua potable.

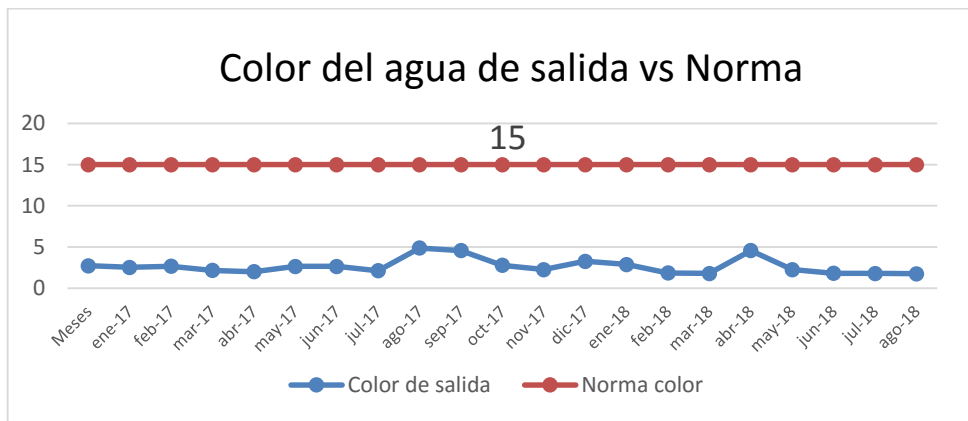


Figura 3.3.1 Color del agua de salida vs norma

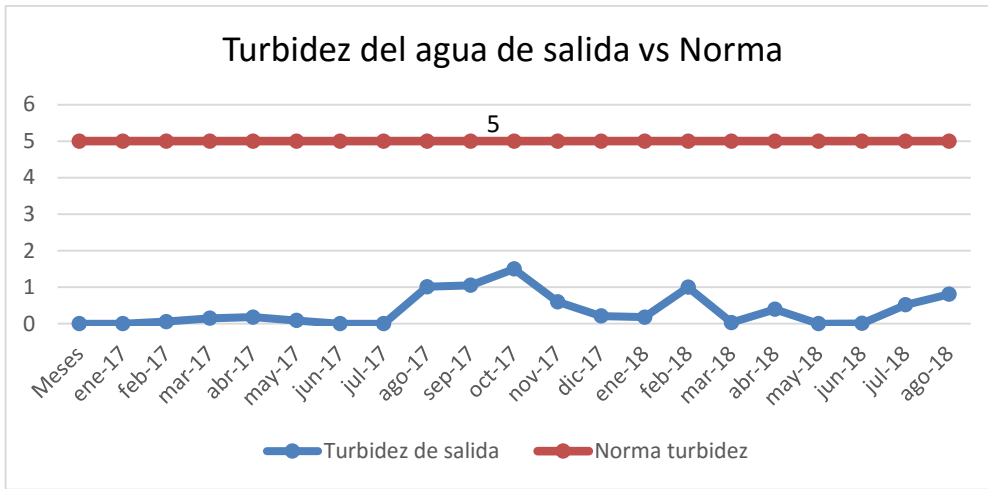


Figura3.3.2 Turbidez del agua de salida vs norma

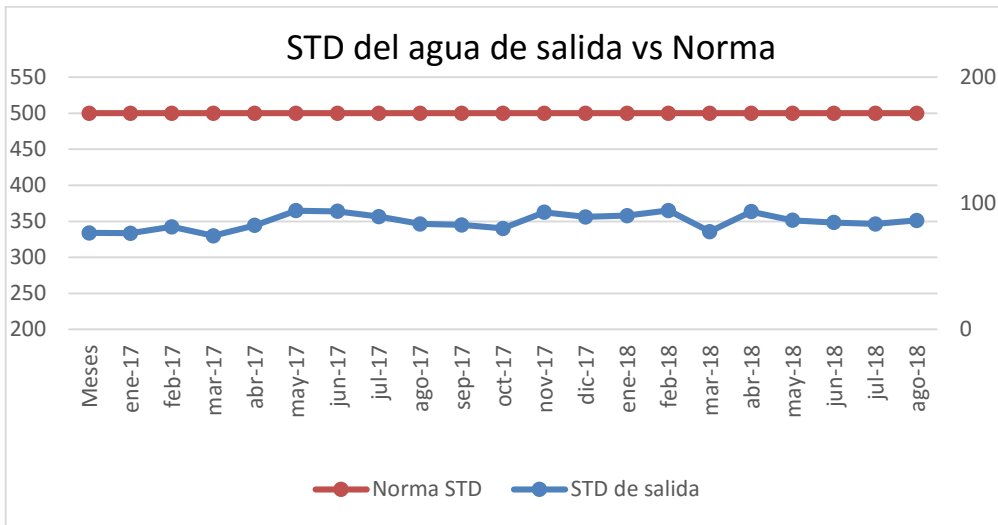


Figura 3.3.3 Sólidos totales disueltos del agua de salida vs norma

En la figura3.3.4se muestra el consumo de sulfato de aluminio vs normativa, donde se observa una variabilidad del mismo por encima, o sea que ha ocurrido un sobreconsumo de reactivo, el cual varía significativamente en los meses donde se reportaron valores mayores de turbidez (Figura 3.2.2.).

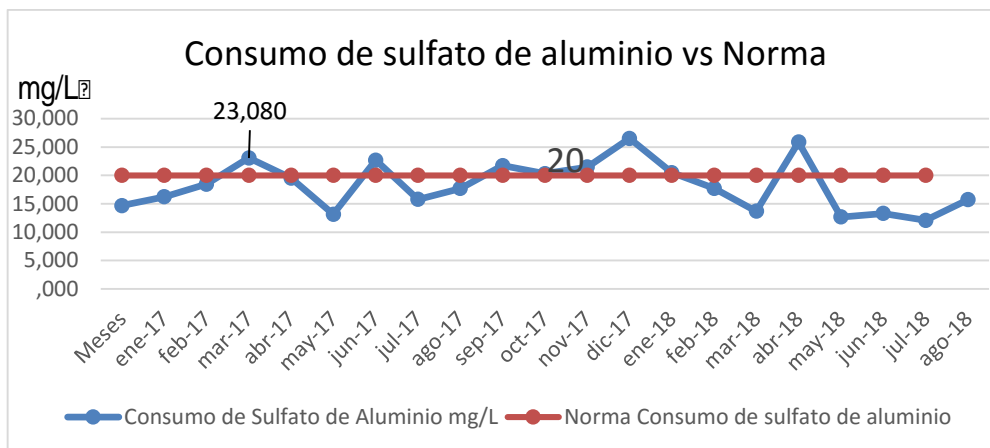


Figura 3.3.4 Consumo de sulfato de aluminio vs norma

3.4. Posibles causas que provocan el incremento del índice de consumo del sulfato de aluminio.

1. Contaminación de la fuente de abasto por el laboreo minero de la industria Pedro Sotto Alba por arrastre de partículas sólidas que provocan el incremento de la turbidez y los sólidos totales disueltos en el agua cruda de entrada.
2. Períodos de lluvias que provocan el incremento de la turbidez y los sólidos totales disueltos en el agua cruda de entrada.
3. Presencia de una alta concentración de sólidos en suspensión en el canal mezclador de la Planta Potabilizadora, lo cual impide la ocurrencia adecuada del proceso de potabilización y conlleva a un incremento significativo en el consumo de sulfato de aluminio.

3.5. Medidas para mejorar la eficiencia del proceso de potabilización

Ante una posible contaminación de la fuente de abasto, mantener una comunicación constante con el personal de Grupo Empresarial de Aprovechamiento de Recursos Hidráulico (GEARH), para que se le dé seguimiento a través de la realización de monitoreos y determinación de análisis químicos.

Ante afectaciones de la calidad del agua potable provocada por contaminación de la fuente de abasto, déficit de reactivos químicos para el correcto tratamiento del agua (sulfato de aluminio y cloro líquido), realización de paros operacionales en la planta o en la red hidráulica de distribución o ante averías en el sistema, se elabora una nota informativa sobre la situación existente y se hace llegar a los organismos pertinentes (Acueducto y Alcantarillado o Poder Popular Municipal).

Sistema de bombeo de agua cruda hacia la Planta Potabilizadora

- Mantener una estrecha comunicación con el personal de la derivadora para garantizar la estabilidad en el suministro de agua cruda.
- Mantener una estrecha comunicación con el Jefe de Turno y Operador de Panel de la Planta Potabilizadora, garantizando un suministro sin interrupciones.
- Garantizar la disponibilidad del equipamiento en la estación de bombeo.
- Supervisión sistemática del sistema automático contra golpe de ariete para evitar posibles averías en el sistema de bombeo.
- Garantizar la disponibilidad del Grupo Electrónico para cuando el proceso lo requiera.

Sistema de preparación y dosificación de reactivos:

- Lograr una adecuada preparación de los reactivos a usar en el proceso, para ello hay que realizar el pesaje real de la cantidad de cada uno, agitar con el tiempo establecido los mismos para garantizar su completa disolución y homogeneización de la solución.
- Darle seguimiento sistemático a la cantidad de reactivo que se dosifica al proceso.

Sistema de clarificación:

- Evitar los cambios bruscos en el flujo de agua de entrada al canal mezclador.

- Distribuir uniformemente el flujo de agua de entrada a cada clarificador.
- Evitar la penetración de aire con el flujo de agua a tratar para impedir el rompimiento del colchón de lodo que se forma en los clarificadores.
- Mantener la recirculación de lodo al proceso para garantizar la eficiencia de los recirculadores que permiten mantener la estabilidad del proceso de clarificación.
- Realizar la operación de extracción de lodo cuando el proceso lo requiera.
- Dar cumplimiento al programa de limpieza de los clarificadores.

Sistema de tratamiento de agua:

- Mantener una eficiente cloración en los distintos puntos de inspección para lograr la desinfección del agua, la oxidación de elementos metálicos y la materia orgánica presente en la misma y evitar una posible contaminación del agua potable durante el suministro a los distintos consumidores.
- Lograr una adecuada distribución del agua clarificada hacia los filtros mecánicos.
- Operar los filtros con niveles de 30 cm por encima de las canaletas, evitando la penetración de aire y el posible arrastre de sólido en suspensión al interior del lecho filtrante.
- Realizar una correcta operación de lavado de los filtros.
- Dar cumplimiento al programa de limpieza de los filtros mecánicos.

3.6. Valoración económica

En la UBS Recepción y Suministro el proceso de potabilización requiere del sulfato de aluminio como un importante coagulante para el correcto desarrollo del proceso. Es importante señalar que en el período del 2017 al 2018 se pudo constatar que existió un sobregiro en este indicador y que esto tiene consecuencias irreversibles para la economía de la industria Comandante Ernesto Che Guevara.

Se analizó el consumo físico de sulfato de aluminio por año teniendo en cuenta el índice de consumo calculado a partir de la prueba de jarras teniendo en cuenta la norma cubana 827 del 2012 que establece los índices máximos permisibles para los parámetros que aseguran una adecuada calidad del agua.

Para determinar el consumo físico por año se utilizó la siguiente ecuación (3.6.1):

$$C_{físico (Al_2(SO_4)_3)} = \frac{V_{H_2O\ potable} \cdot I_{C(Al_2(SO_4)_3)}}{1\ 000\ 000} \quad (3.6.1)$$

Donde:

$C_{físico (Al_2(SO_4)_3)}$: Consumo físico del sulfato de aluminio, t

$V_{H_2O\ potable}$: Volumen de agua potable, m^3

$I_{C(Al_2(SO_4)_3)}$: Índice de consumo del sulfato de aluminio, mg/L

El índice de consumo de sulfato de aluminio en los años 2017 y 2018 planificado fue de 20 mg/L .

Se utilizó los datos de volúmenes de agua potable de los años 2017 y 2018 que aparecen en el reporte técnico de la UBS reflejados en la tabla (3.6.1):

Tabla 3.6.1 Volúmenes de agua potable

$V_{(H_2O)potable} (m^3)$		
	2017	2018
Plan	16517199	19352868
Real	15744000	20536000
Desviación	-773199	1183132

Se obtuvieron los siguientes resultados en la (Tabla 3.6.2) a partir de la ecuación (3.6.1):

Tabla 3.6.2 Consumo físico del sulfato de aluminio

Consumo físico (sulfato de aluminio)

	2017	2018
Plan	330,34	387,06
Real	314,88	410,72
Desviación	-15,46	23,66

Se calculó el gasto planificado del sulfato de aluminio en el período de investigación, a través de la siguiente ecuación (3.6.2):

$$G_{plan(Al_2(SO_4)_3)} = C_{t\ año(Al_2(SO_4)_3)} \cdot P_{t(Al_2(SO_4)_3)} \quad (3.6.2)$$

Donde

$G_{plan(Al_2(SO_4)_3)}$: Gasto planificado, CUP-CUC

$C_{t\ año(Al_2(SO_4)_3)}$: Cantidad de toneladas de sulfato de aluminio consumidas al año, t

$P_{t(Al_2(SO_4)_3)}$: Precio del sulfato de aluminio, t/CUP-t/CUC

Se utilizó el precio del reactivo en cuestión para el período comprendido:

- 344,821 CUP
- 375,925 CUC

Se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 3.6.3):

Tabla 3.6.3 Gasto planificado

Gasto Planificado					
2017					
Plan		Real		Desviación	
CUP	CUC	CUP	CUC	CUP	CUC
113909,542	124184,56	108577,24	118371,264	-5332,31	-5813
2018					
Plan		Real		Desviación	
CUP	CUC	CUP	CUC	CUP	CUC
133465,506	145504,54	141624,88	154399,916	8159,375	8895,4

Se concluyó que existió un sobreconsumo de sulfato de aluminio de 23,66t lo que conllevó a un sobregiro del presupuesto en 8 159,375 CUP y 8 895,4 CUC lo que propició un deterioro del presupuesto de gasto del Centro de Costo CC:100201.

A partir del análisis realizado de la valoración económica se constató que existió un aumento en la desviación del índice de consumo de sulfato de aluminio del 2017 al 2018. Por tal motivo se autorizó por el grupo técnico de la empresa el incremento de la norma de este reactivo a 25 mg/L .

3.7. Protección al hombre y al medio ambiente

Dada la posición geográfica de Moa, en el Océano Atlántico, área comprendida en una región muy activa en la formación de ciclones tropicales, paso obligatorio de embarcaciones de gran porte que intervienen en el comercio internacional, tránsito de aves migratorias, así como su cercanía a la zona sismogeneradora originada por el contacto sobre la placa del Caribe y Norteamérica, las características del clima tropical húmedo, con dos estaciones fundamentales en el año, una seca (noviembre - abril) y otra de lluvia (mayo - octubre) condiciona los riesgos ante peligros de origen natural (hidrometeorológicos, geológicos), tecnológicos y sanitarios.

En el proceso productivo de la Planta Potabilizadora intervienen algunos productos que categorizar como objetivo con peligro químico (cloro), ya que pueden originar pequeños, medianos y grandes focos de contaminación química por diferentes causas, debido a fenómenos naturales y tecnológicos.

El cloro se almacena en estado líquido en balas de un TM de capacidad, manteniéndose en la planta de agua hasta cuatro y un parque en almacén de hasta ocho TM. Este es un gas verdoso con olor desagradable, dos veces y medio más denso que el aire, no arde pero propicia la combustión. La afectación a las personas se realiza por las vías respiratorias, destruye los alvéolos pulmonares como consecuencia de la formación de ácido clorhídrico, produciendo edema pulmonar y la muerte. Es irritante y sofocante, siendo uno de los productos tóxicos. Por lo general las intoxicaciones con cloro son graves.

Se crea un foco secundario de contaminación por las afectaciones de este gas, el cual puede llegar hasta un radio de un kilómetro. La expansión de la nube tóxica

en la dirección del viento puede afectar áreas de la fábrica Pedro Soto Alba y el poblado de la Veguita y Cabaña, según la dirección de este. La posible cantidad de afectados puede ser de 2135 personas si la nube sobrepasa los límites de la planta.

No existe una contaminación al medio ambiente por el sulfato de aluminio, pero afecta al hombre. El mismo puede afectar por inhalación, el contacto puede irritar la piel y los ojos, causando erupciones y sensación de ardor. Es corrosivo para los ojos cuando se encuentra en solución acuosa y la inhalación del mismo puede irritar la nariz, la garganta y el pulmón, causando tos, respiración con silbido o falta de aire.

El sulfato de aluminio puede reaccionar con el agua para formar ácido sulfúrico, que es corrosivo. Para obtener más información, puede consultarse la Hoja Informativa de Sustancias Peligrosas del Derecho a Saber del Ácido Sulfúrico.

En caso de derrame de sulfato de aluminio, se toman las siguientes medidas:

- Evacuar al personal. Restringir e impedir el acceso a la zona.
- Eliminar todas las fuentes de ignición.
- Recoger el material pulverizado de la manera más práctica y menos riesgosa y depositar en recipientes herméticos para la eliminación.
- Ventilar y lavar la zona después de completar la limpieza.
- NO eliminar al alcantarillado los derrames por lavado.
- Pueden obtenerse recomendaciones específicas comunicándose con la oficina regional de la EPA o el DEP estatal.

3.9 Conclusión Capítulo 3

En este capítulo mediante el método paso a paso hacia atrás, se determinó que las variables más significativas para el proceso son la turbidez y sólidos totales disueltos, obteniendo el siguiente modelo matemático:

$$\text{Consumo}_{Al_2(SO_4)_3} = 41,93 + 0,056 \cdot \text{Turbidez} - 0,283 \cdot \text{STD}$$

Se compararon las medias reales de consumo de sulfato de aluminio para rangos de turbidez, demostrando que existe una regularidad en ambos comportamientos, sin embargo, en todos los casos se corrobora que los consumos reales utilizados en la actualidad en la planta son superiores al calculado por el modelo matemático.

CONCLUSIONES

- 1- Se realizó la caracterización del proceso de potabilización de la UBS Recepción y Suministro de la Empresa Ernesto Che Guevara, así como de los diferentes parámetros que influyen en el mismo.
- 2- Se determinó mediante métodos estadísticos de correlación y regresión la relación existente entre los parámetros del agua, como el color, la turbidez y los sólidos totales disueltos con el consumo de sulfato de aluminio, los cuales son significativos para el proceso. Obteniendo un modelo matemático en función de la turbidez y los sólidos totales disueltos:

$$\text{Consumo}_{Al_2(SO_4)_3} = 41,93 + 0,056 \cdot \text{Turbidez} - 0,283 \cdot \text{STD}$$

Se obtuvo la dosis óptima media para el consumo de sulfato de aluminio en base a rangos de turbidez, lo que comprobó que la dosis añadida actualmente es superior a la necesaria.

- 3- Se realizó una prueba de hipótesis sobre las medias de muestras pareadas (prueba t-student), a los parámetros más significativos, determinando que la cantidad de sulfato de aluminio aplicada mejora el color y a la vez la turbidez del agua, no siendo así para los sólidos totales disueltos, lo cual no es beneficioso para el proceso de potabilización.
- 4- Al comparar con las normas establecidas para agua potable se comprobó que los parámetros de agua cumplen con la misma, no siendo así para el consumo de sulfato de aluminio que muestra un sobreconsumo en el año 2018 de 23,66 toneladas lo que conllevó a un sobregiro del presupuesto en 8 159,375 CUP y 8 895,400 CUC propiciando un deterioro del presupuesto de gasto del Centro de Costo CC:100201.

- 5- Se identificaron las posibles causas que provocan el incremento del sobreconsumo del sulfato de aluminio y se proponen medidas para mejorar la eficiencia del proceso de potabilización.

RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar estudios para el posible empleo de algún polímero natural en sustitución del sulfato de aluminio, de forma tal que se reduzcan los costos del proceso.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- AENOR. La historia del tratamiento del agua: un camino hacia la mejora radical de la salud pública., AIRE, AGUA Y LEGIONELLA; 2018.
- Amorocho, F.D. "Optimización de la coagulación-floculación en la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional Campoalegre-Cajasan"; 2013.
- Bedoya, D.C. "Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento de Villa Santana" [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2012.
- Bravo, C.A.V.C.a.E.C. "Técnicas de Inteligencia Computacional Aplicadas a Modelos de Estimación de Coagulante en el Proceso de Potabilización de Agua.". Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. 2013:205-215.
- Castillo, D.F. "Utilización de materiales de origen nacional como coagulantes y floculantes en el tratamiento de aguas.". Instituto Tecnológico de Costa Rica; 2006.
- C. Gagnon, B.P.G.a.J.T. "Modelling of coagulant dosage in a water treatment plant.". Vol. 11; 1997.
- C. Montoya, D.L., P. Torres, C. H. Cruz, and J. C. Escobar. "Effect of increase of raw water turbidity on efficiency of conventional drinking water treatment processes.". Revista EIA. 2011:137-138.
- Claudia Barajas, A.L. "Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio con el uso de una red neuronal artificial.", Bogotá.; 2015.
- Agua, C.N.d. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, diseño de Plantas Potabilizadoras tipo de tecnología simplificada. Vol. 2416. Coyoacán, México; 2014.
- Delgado, S.Á.y.T. Estadística Elemental. Playa, Ciudad de La Habana; 1990. 332 p.

- H. R. Maier, N.M., and C. W. Chow. "Use of artificial neural networks for predicting optimal alum doses and treated water quality parameters." Vol. 19; 2004.
- José F. Hernández G., Y.C.U.M., Marlenis Aguilar., Miguel García y José Landaeta. "Dosis óptima en mezcla de sulfato de aluminio y polímeros naturales para la clarificación del Río Tuy, Estado Miranda." [Venezuela]; 2015. Consulta: 12 may 2019. Disponible en: <http://www.postgradovipi.50webs.com/agro>
- Liliana, A.Z.a.D. "Modelo de correlación entre las variables medibles en línea que afectan el proceso de determinación de la dosis óptima de coagulante en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SAESP"; 2008.
- López, M. "Eficacia del quitosano como coagulante durante el tratamiento de agua cruda proveniente de la cuenca media del río Guatapurí". [Colombia]; 2015.
- Manual de Operaciones In: Guevara, U.R.y.S.d.l.e.E.C., Productora de Níquel y Cobalto. editor. Moa; 2016. p. 110.
- Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid; 1992.
- Orellana, J. "Tratamiento de las aguas."; 2006. 123 p.
- Osorno, H.A.R. "Evaluación del proceso de coagulación floculación de una planta de tratamiento de agua potable." In: Minas, F.d., editor; 2009. p. 109.
- Pérez, J.A. "Calidad del agua." In: Colombia, U.N., editor. Bogota, Colombia; 2010.
- Registro, Código 348-R-14/PO-2. Modelo de Análisis Químico. Laboratorio Planta Potabilizadora de la UBS Recepción y Suministro de la Empresa "Ernesto Che Guevara". [Cuba]; 2017, 2018.
- S. Heddam, A.B.a.N.D. "ANFIS- based modelling for coagulant dosage in drinking water treatment plant: a case study," Environmental monitoring and assesmen." Vol. 184; 2012.

Sibiya, S.M. "Evaluation of the streaming current detector (SCD) for coagulation control."; 2014. 1211-1220 p.

Simon, F. Elementary Statistics; 1992.

W. López, G.N., and A. Barrionuevo. "Programa predictor de dosis óptima de coagulante: planta San Martín, planta Manuel Belgrano.". AIDIS ed. Argentina; 2004. 1-4 p. Consulta: 20 feb 2019. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/lopez.p>

Y. A. Cardenas, L.d.V., and A. B. Martel. "Tratamiento de agua: coagulación - floculación.". In: SEDAPAL, editor. Lima; 2000.

ANEXOS

Anexo 1: Características de las materias primas, materiales auxiliares y productos terminados

Tabla. 2.1.1. Características de la materia prima

Análisis	Norma	U/M
AlcP	0	mg/L CaCO ₃
AlcM	≤100	mg/ L CaCO ₃
Color	(10 a 550)	Pt/Co
Dt	≤80	mg/ L CaCO ₃
Dca	≤15	mg/l LCaCO ₃
DMg	≤65	mg/ L CaCO ₃
pH	(7 a 8,3)	*
Turbidez	≤400	N.T.U
S.T.D	≤500	mg/ L
S/S	≤50	mg/ L
Conductividad	(120 a 220)	
SiO ₂	≤22	mg/ L
SO ₄ ²⁻	≤30	mg/ L
Cl ⁻	≤20	mg/ L
Fe Total	≤20	mg/ L
M.O.	≤5,0	mg/l O ₂ conc
Temp.	(20 a 31)	°C
Al	≤0,2	mg/ L
Ni	≤0,04	mg/ L
Zn	≤0,04	mg/ L
Ca	≤15	mg/ L
Mg	≤20	mg/ L
Co	≤0, 001	mg/ L
Cr ⁺⁶	≤0,07	mg/ L
Cr Total	≤0,2	mg/ L
Mn	0	mg/ L
Nitrato	≤0,02	mg/ L
Nitrito	≤0,02	mg/ L
Cu	≥ 0,01	mg/ L

Tabla.2.1.2 Agua de Proceso

Parámetros	U/M	Especificación
Alcalinidad Parcial	mg/ L CaCO3	0
Alcalinidad Total	mg/ L CaCO3	≤100
Color	Pt/Co	5 a 15
Turbidez	NTU	5 a 10
Dureza Total	mg/ L CaCO3	≤80
Dureza Cálcica	mg/ L CaCO3	≤15
Dureza Magnésica	mg/ L CaCO3	≤65
PH		7 a 8.
S.T.D	mg/ L	≤80
S/S		≤50
Conductividad	μs/cm	120 a 200
SiO2	mg/ L	≤22
Cloruro	mg/ L	200 a 250
Sulfato	mg/ L	≤30
Hierro	mg/ L	0.1 a 0.3
Materia Orgánica	mg/l O ₂ Cons	≤3
Temperatura	°C	22 a 30
Aluminio	mg/ L	0.05 a 0.2
Calcio	mg/ L	≤75
Magnesio	mg/ L	≤30

Tabla 2.1.3 Sulfato de aluminio AL₂(SO₄)₃

Contenido de:	Concentración
Aluminio	7,34 % (mínimo)
AL ₂ O ₃	16 % (mínimo)
H ₂ SO ₄	90,23%
pH	2,5 a 5,9
Materia insoluble	0,11 % (mínimo)

Tabla 2.1.4. Cal Hidratada Ca (OH)₂

Contenido de:	Concentración
MgO	4,77 % (mínimo)
Fe ₂ O ₃	0,17 % (mínimo)
Fe	0,12%
SiO ₂	1,50%
CaO	92,10%
Materia insoluble	1,25 % (mínimo)

Tabla 2.1.5 Cloro (Cl₂)

Contenido de:	Concentración
Grado Pureza	99,50%
Humedad	0,05%
Peso volumétrico	2,147 % (mínimo)

Tabla 2.1.6 Floculante A-130.

Contenido de:	Concentración
Estado de agregación	Sólido
Aspecto	Polvo
Color	Blanco
Solubilidad en agua	Máximo 3 g/L
Carácter iónico	Aniónico
Peso molecular	Alto
PH (1 %) a Temperatura 25 °C	5 a 7

Tabla 2.1.7. Producto terminado

Análisis	Norma	U/M
AlcP	0	mg/L CaCO ₃
AlcM	≤100	mg/L CaCO ₃
DT	(100 a 400)	mg/L CaCO ₃
Dca	≤20	mg/L CaCO ₃
DMg	≤80	mg/L CaCO ₃
S.T.D	(500 a 1000)	mg/L
Conductividad	(120 a 220)	(μs/cm ²)
SiO ₂	≤22	mg/L
SO ₄	(200 a 400)	mg/L
Cl ⁻	(200 a 250)	mg/L
Fe Total	≤0.3 (*)	mg/L
M.O.	≤3	mg/L O ₂ Consumido
Temp.	(22 a 31)	°C
Al	(0,05 a 0,2)	mg/L
Ca	(75 a 200)	mg/L
Mg	30(si existe 25 0mg/L de SO ₄ y 150 si existe menos 250 mg/L de SO ₄	mg/L
	ausente, se admite hasta 0.05	
Cr ⁺⁶	(0,01 a 0,02)	mg/L

Continuación Tabla 2.1.7. Producto terminado

Ni	(5 a 15)	mg/L
Zn	ausente, se admite hasta 1	mg/L
Co	ausente, se admite hasta 0.05	mg/L
Cr Total	(0.05 a 1)	mg/L
Cu	(0.05 a 0.1)	mg/L
Mn	ausente (**)	mg/L
Nitrito	(7 a 8)	mg/L
PH	(50 a 200)	-
Na		mg/L
	-2,2 hasta 5.1	
Coliformes		NMP/100 mL

Anexo 2 Base de datos

Tabla 3.1.3 Agua de entrada

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. °C
0,00	24,27	187	34	7,86	0	56	66	19,71	1,50	162	74	25
0,00	24,27	156	21	8,03	2	63	68	15,26	1,80	166	77	25
0,00	17,01	228	34	8,03	2	65	75	15,76	1,90	168	77	25
0,00	17,01	105	10	8,08	2	66	74	15,76	1,80	172	79	26
0,00	14,94	98	11	8,05	2	66	76	15,76	2,00	173	79	26
0,00	14,94	86	11	8,05	2	71	81	16,74	1,70	172	79	25
5,40	16,76	98	14	8,08	2	72	82	15,26	1,70	172	79	26
5,40	16,76	83	16	8,08	2	70	77	15,76	1,80	172	80	25
0,00	17,47	85	12	8,06	2	67	74	15,76	1,70	171	79	25
0,00	17,47	79	14	8,07	2	63	73	15,26	1,90	168	77	24
2,50	14,31	115	19	8,05	2	62	74	14,77	1,90	162	75	25
2,50	14,31	158	22	8,06	2	61	73	14,77	2,20	150	70	25
0,00	21,87	289	47	7,97	0	52	53	13,29	2,00	126	58	25
0,00	21,87	156	27	8,05	2	57	60	12,8	2,90	137	63	24
10,30	20,38	135	21	8,02	2	55	61	13,29	3,00	131	61	25
10,30	20,38	109	18	8	0	56	59	13,29	2,80	142	66	25
3,00	17,82	81	8	8,06	1	61	71	13,78	2,50	151	69	26
3,00	17,82	138	22	8,08	2	61	71	13,29	2,40	155	72	26
0,20	17,62	69	10	8,08	2	63	76	13,79	2,20	157	73	26
0,20	17,62	60	9	8,09	2	62	70	14,77	2,10	161	74	25
27,50	15,99	61	8	8,11	2	62	69	13,79	2,00	160	74	25

Continuación Tabla 3.1.3 Agua de entrada

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. oC
27,50	15,99	95	14	8,1	2	57	77	14,77	1,70	153	70	24
0,00	18,13	155	25	8,14	2	60	75	15,26	1,80	144	67	23
0,00	18,13	98	16	8,1	2	56	73	14,77	2,00	150	69	25
1,50	15,87	127	24	8,08	2	64	76	15,76	1,90	155	71	24
1,50	15,87	157	22	8,15	2	65	76	14,77	2,05	163	74	25
13,00	17,86	101	17	8,13	2	67	77	14,28	2,20	167	77	24
13,00	17,86	90	12	8,12	2	70	78	15,26	1,80	170	78	25
10,50	15,83	76	10	8,3	2	66	74	13,79	2,20	170	71	25
10,50	15,83	119	14	8,11	2	61	72	13,79	2,30	169	78	25
14,20	14,36	83	13	8,13	2	66	74	14,77	2,00	168	78	25
14,20	14,36	82	14	8,15	2	66	74	14,77	2,10	167	77	24
0,00	20,11	60	12	8,15	2	71	75	15,76	2,10	168	77	25
0,00	20,11	61	9	8,17	2	71	77	15,77	2,00	169	78	26
4,50	17,65	72	9	8,22	2	73	85	15,76	2,00	171	79	25
4,50	17,65	62	9	8,23	2	74	81	15,76	1,90	171	78	25
5,50	17,07	70	11	8,22	2	75	80	15,76	2,00	171	79	26
5,50	17,07	153	22	8,17	2	67	75	15,76	2,10	164	76	25
0,00	15,42	175	28	8,07	2	63	76	14,28	2,20	160	74	25
0,00	15,42	277	45	8,07	2	62	75	14,57	2,20	160	74	25
4,50	23,89	228	37	8,13	2	63	76	15,76	2,00	164	75	25
4,50	23,89	163	24	8,16	2	65	75	15,76	2,00	164	78	25
2,20	21,46	128	17	8,14	2	73	82	15,82	2,50	163	75	25
2,20	21,46	80	10	8,1	2	74	82	15,76	2,30	169	78	25
19,00	20,52	196	33	8,05	2	60	66	13,79	2,20	153	70	23
19,00	20,52	131	21	8,12	2	58	66	14,77	2,30	160	73	24
2,50	22,22	184	35	8,1	2	59	70	14,77	2,40	156	72	24
2,50	22,22	182	20	8,16	2	63	72	15,76	2,10	164	75	25
2,30	21,54	244	40	8,05	2	58	72	13,78	2,40	153	71	25
2,30	21,54	352	60	8,05	2	62	69	15,26	2,40	145	67	25
2,50	21,06	297	49	8,11	2	63	72	15,26	2,40	156	72	26
2,50	21,06	167	28	8,18	2	65	78	15,26	2,30	161	74	26
0,00	28,42	1132	188	7,28	0	37	46	13,29	3,10	95	43	25
0,00	28,42	684	109	7,92	0	42	59	12,85	2,80	112	52	24
3,20	32,32	325	42	7,96	0	51	71	12,35	2,50	120	55	25
3,20	32,32	251	42	7,91	0	55	75	12,8	2,30	134	61	25
4,40	20,17	241	41	8	2	62	79	12,31	1,90	153	70	26
4,40	20,17	180	29	8,09	2	63	79	13,79	1,90	160	74	26
21,00	20,7	161	23	8,11	2	70	78	14,89	2,30	165	76	25

Continuación Tabla 3.1.3 Agua de entrada

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. °C
21,00	20,7	97	15	8,15	2	73	78	14,28	2,10	165	76	25
0,00	17,36	282	45	7,97	0	54	57	13,79	2,10	141	65	23
0,00	17,36	250	39	7,96	0	58	63	14,28	1,90	146	67	23
2,50	17,74	206	35	7,98	1	66	67	14,28	1,80	148	68	24
2,50	17,74	246	40	8,05	2	65	68	13,79	2,00	149	69	24
0,00	16,87	201	27	8,04	2	66	70	14,28	1,90	150	69	25
0,00	16,87	130	21	8,04	2	63	69	15,26	1,80	150	69	24
0,00	17,15	168	26	8	1	65	71	14,28	2,00	154	70	24
0,00	17,15	129	20	7,99	1	64	70	15,76	1,90	157	72	24
0,00	14,16	106	16	8,09	2	64	69	15,76	2,20	162	75	24
0,00	14,16	106	14	8,08	2	64	72	15,26	2,20	161	74	24
0,00	18,71	19	14	8,03	1	64	66	13,79	2,00	162	75	24
0,00	18,71	91	12	8,1	2	65	65	13,79	2,10	162	75	24
0,00	23,56	90	12	8,05	2	65	69	13,79	2,00	163	75	24
0,00	23,56	96	14	8,04	2	64	70	13,79	2,10	164	76	24
0,00	23,52	91	13	8,02	2	62	71	13,79	2,10	165	76	25
0,00	23,52	80	16	8,05	2	63	71	14,77	2,00	165	76	25
2,50	20,42	106	17	8,11	2	66	74	15,76	2,00	165	76	24
2,50	20,42	91	12	8,11	2	65	72	15,26	2,00	165	76	24
0,00	22,59	88	13	8,1	2	64	71	15,26	1,90	165	76	24
0,00	22,59	111	16	8,04	1	62	71	14,77	2,10	156	72	24
0,00	26,29	313	51	7,99	0	55	71	13,79	2,40	127	58	24
0,00	26,89	309	52	7,98	0	56	68	13,79	2,10	124	57	24
60,40	51,89	194	31	8,05	2	60	66	14,77	2,30	140	65	24
60,40	51,89	105	16	8,08	2	61	69	16,19	2,20	152	70	24
25,50	15,94	90	15	8,08	2	63	70	16,19	2,20	154	71	24
25,50	15,94	88	16	8,07	2	63	71	15,21	2,20	155	71	24
8,20	19,01	169	35	8,03	2	66	70	15,65	2,30	151	69	24
8,20	19,01	368	58	7,96	0	55	68	14,67	2,40	141	65	23
0,00	28,04	448	72	7,93	0	53	67	13,69	2,30	132	61	24
0,00	28,04	529	84	7,99	0	53	68	13,69	2,30	138	63	24
200,50	20,89	123	21	7,89	0	66	71	15,7	2,00	156	72	22
200,50	20,89	436	89,8	7,85	0	47	59	14,22	2,10	117,2	54	22
57,50	42,66	994	932	7,29	0	30	34	8,86	2,70	47	182	24
57,50	42,66	1617	279	7,58	0	33	42	8,86	2,70	104	48	22
1,50	63,87	1043	173	7,59	0	35	46	10,34	2,50	108	49	23

Continuación Tabla 3.1.3 Agua de entrada

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. oC
4,70	36,83	368	63	7,68	0	47	53	12,8	2,30	138	63	23
0,00	22,73	256	42	7,88	0	50	55	13,29	2,00	146	67	23
0,00	22,73	247	38	7,84	0	56	62	14,77	1,90	152	70	23
17,50	23,49	174	28	7,94	0	60	69	15,26	1,80	154	71	24
17,50	23,49	162	25	7,88	0	62	77	15,26	1,90	156	72	24
9,50	20,88	323	52	7,82	0	66	71	15,74	1,90	146	67	23
9,50	20,88	574	86	7,65	0	46	59	14,74	2,20	108	50	23
32,00	28,49	807	137	7,53	0	43	48	14,15	2,30	101	46	23
32,00	28,49	943	155	7,51	0	44	48	15,16	2,30	103	47	23
14,50	32,44	787	127	7,55	0	49	49	14,18	2,40	108	50	24
14,50	32,44	1068	203	7,69	0	50	52	14,67	2,60	115	53	23
6,20	29,41	1014	169	7,71	0	57	59	15,13	2,90	123	56	24
6,20	29,41	1241	216	7,72	0	41	48	13,67	2,50	118	54	23
2,00	42,69	1041	170	7,71	0	49	49	13,49	2,30	121	55	24
2,00	42,69	615	98	7,68	0	58	61	14,53	2,10	132	61	24
0,20	24,59	1041	170	7,71	0	49	49	13,49	2,30	121	55	24
0,20	24,59	615	98	7,68	0	58	61	14,53	2,10	132	61	24
47,50	26,38	227	35	7,93	0	71	73	15,7	2,30	159	73	24
47,50	26,38	254	39	7,86	0	69	72	15,68	2,40	157	72	24
40,30	21,17	1408	236	7,76	0	50	59	13,18	2,80	111	51	24
40,30	21,17	1202	189	7,67	0	47	56	15,52	2,90	119	55	23
2,50	35,45	1175	192	7,72	0	52	56	16,01	3,00	116	53	24
2,50	35,45	1470	239	7,65	0	44	52	16,13	2,70	108	49	23
2,50	35,66	860	138	7,77	0	54	62	15,62	2,30	122	57	24
2,50	35,66	513	82	7,85	0	57	65	15,68	2,20	134	62	23
0,00	21,05	373	64	7,77	0	61	73	16,87	2,20	140	64	23
0,00	21,05	176	31	7,78	0	57	62	17,73	1,20	151	69	23
2,50	23,36	297	49	7,8	0	62	69	14,33	2,30	143	67	24
2,50	23,36	184	29	7,89	0	63	71	15,32	2,20	143	68	23
0,00	13,45	162	21	7,87	0	58	70	15,72	1,50	136	63	24
0,00	13,45	90	11	7,85	0	59	98	14,21	1,90	141	65	23
0,00	14,33	33	5	7,86	0	62	75	15,7	1,70	151	70	23
0,00	14,33	25	4	7,82	0	61	73	15,7	1,60	151	69	22
0,00	14,98	30	4	7,93	0	69	75	16,67	1,60	159	73	25
0,00	14,98	21	4	7,88	0	72	77	16,55	1,50	160	74	25
0,00	20,28	89	12	7,8	0	64	67	14,09	1,60	157	73	24

Continuación Tabla 3.1.3 Agua de entrada

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. oC
0,00	26,09	1073	170	7,53	0	42	59	14,09	2,80	103	47	23
0,00	29,87	705	114	7,67	0	47	60	14,09	2,60	102	48	23
0,00	29,87	351	58	7,72	0	50	66	14,09	2,40	123	57	22
0,00	23,63	171	29	7,77	0	54	62	15,59	2,20	134	62	24
0,00	23,63	71	12	7,8	0	58	68	15,59	1,70	148	68	23
14,50	20,71	68	11	7,78	0	62	70	14,59	1,70	149	69	25
14,50	20,71	43	8	7,81	0	65	73	15,09	1,70	152	70	23
8,20	24,42	44	7	7,82	0	68	73	14,09	1,70	154	71	23
8,20	24,42	35	6	7,82	0	68	71	13,99	1,70	155	72	22
0,00	22,42	69	12	7,84	0	65	75	13,37	1,70	153	70	22
0,00	22,42	126	24	7,72	0	60	72	15,38	1,80	146	67	22
6,20	17,48	57	8	7,9	0	65	72	15,76	1,60	149	69	24
6,20	17,48	49	8	7,93	0	67	73	15,76	1,60	154	71	23
0,00	11,5	42	8	7,91	0	69	75	15,49	1,60	152	70	25
0,00	11,5	42	9	7,92	0	66	74	15,49	1,70	148	68	25
0,00	15,2	29	4	7,96	0	65	69	14,99	1,60	163	75	25
0,00	15,2	35	3	7,98	1	64	73	15,81	1,50	165	76	25
0,00	16,7	41	6	8,2	4	60	74	14,09	1,10	167	77	26
0,00	16,7	44	7	8,14	4	60	71	15,49	1,50	165	76	24
0,00	15,52	35	6	8,09	2	65	72	15,99	1,50	164	76	26
0,00	15,52	34	6	8,09	2	61	73	15,99	1,50	167	77	26
0,00	15,15	60	11	8,01	2	53	68	15,99	1,90	165	76	24
0,00	15,15	72	15	7,98	2	56	68	15,99	1,70	165	75	24
0,00	15,47	47	9	8,06	2	57	71	15,99	1,60	168	77	25
0,00	15,47	59	13	8,05	2	56	70	15,99	1,70	168	78	25
32,00	51,63	690	127	7,85	0	33	51	14,99	2,30	114	53	24
32,00	51,63	539	90	7,77	0	27	54	13,49	2,30	104	48	23
0,00	50,1	697	113	7,78	0	29	53	13,99	2,40	113	52	24
0,00	50,1	605	104	7,8	0	33	51	13,99	2,60	114	52	22
14,00	29,77	479	74	7,89	0	36	57	13,99	2,60	118	55	24
14,00	29,77	333	54	7,8	0	43	57	13,49	2,50	134	62	24
0,00	30,38	267	45	7,81	0	46	57	15,99	2,20	134	62	23
0,00	30,38	192	28	7,69	0	45	60	15,49	2,10	143	66	24
58,50	24,21	174	27	7,71	0	48	67	13,99	2,10	153	70	24
58,50	24,21	114	17	7,72	0	48	70	13,99	2,00	157	71	25
0,00	21,42	163	25	7,71	0	47	58	13,99	2,10	146	67	26

Continuación Tabla 3.1.3 Agua de entrada

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. oC
3,20	20,92	122	19	7,68	0	68	71	15,99	1,80	161	74	26
38,50	21,93	393	67	7,93	0	53	63	14,49	1,70	141	65	26
38,50	21,93	1381	395	8,3	0	36	50	12,49	1,70	110	51	25
2,20	58,2	1199	124	7,86	0	31	48	13,49	1,60	103	47	25
2,20	58,2	1458	254	7,88	0	35	50	13,49	1,50	108	50	24
0,00	71,3	877	137	8,02	0	50	56	14,99	1,80	124	57	26
0,00	71,3	539	98	7,71	0	56	64	15,76	2,10	140	64	25
0,00	52,34	594	96	7,72	0	59	62	15,76	2,00	141	65	26
0,00	52,34	365	67	7,65	0	59	64	16,49	1,80	141	65	25
4,20	30,17	206	35	7,67	0	60	64	16,49	1,70	155	71	26
4,20	30,17	175	28	7,89	0	63	67	15,99	1,60	160	75	26
0,00	39,64	180	30	7,81	0	61	66	16,49	1,60	153	70	26
0,00	39,64	333	55	7,62	0	61	64	15,99	1,70	148	68	25
10,50	35,16	280	47	7,73	0	63	66	15,99	1,60	158	73	27
10,50	35,16	166	31	7,85	0	62	67	16,49	1,50	163	75	26
16,80	30,26	142	25	7,6	0	60	68	17,49	1,50	166	76	26
16,80	30,26	134	24	7,85	0	65	73	16,49	1,60	168	78	26
0,00	28,02	135	23	7,87	0	71	75	15,99	1,80	169	78	26
0,00	28,02	154	28	7,76	0	70	73	15,99	1,90	170	78	25
0,00	27,53	147	22	7,79	2	73	78	15,99	1,60	173	79	26
0,00	27,53	114	19	7,67	0	72	73	15,99	1,70	173	79	27
2,30	20,2	112	16	7,62	2	73	79	15,99	1,70	176	81	26
2,30	20,2	92	13	7,58	2	73	79	15,99	1,70	176	81	26
0,00	23,15	103	16	7,87	1	69	74	15,49	1,90	166	76	28
0,00	23,15	128	21	7,8	0	63	67	15,99	1,90	149	68	26
2,20	26,06	208	36	7,7	2	65	73	15,99	2,00	170	78	28
2,20	26,06	210	37	7,58	1	72	76	15,99	2,00	173	80	28
5,00	25,89	156	27	7,66	2	73	74	15,99	1,80	173	80	28
5,00	25,89	140	26	7,71	2	74	72	15,99	1,80	173	79	26
0,00	25,48	166	30	7,72	2	73	73	15,99	1,80	173	79	28
0,00	25,48	121	19	7,65	2	72	72	15,99	1,80	171	79	26
0,00	21,96	106	16	7,67	2	73	74	15,99	1,70	172	80	27
0,00	21,96	81	16	7,91	2	74	73	15,99	1,70	174	80	26
0,00	23,36	90	15	7,63	2	75	76	15,99	1,70	175	81	26
0,00	23,36	72	11	7,58	2	75	78	15,99	1,60	174	80	26
0,00	21,71	79	13	7,78	2	77	79	15,99	1,90	174	81	28

Continuación Tabla 3.1.3 Agua de entrada

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. oC
0,00	22,08	88	14	7,77	2	71	72	16,49	1,90	165	76	26
0,00	29,89	72	12	7,68	2	71	72	16,49	1,60	165	76	26
0,00	29,89	80	11	7,64	2	70	73	16,49	1,70	165	76	26
0,00	27,96	54	8	7,66	2	70	73	15,99	1,80	166	76	27
0,00	27,96	73	9	7,81	2	68	73	15,99	1,70	166	76	27
2,20	20,22	82	13	7,45	4	70	75	15,99	2,10	171	79	27
2,20	20,22	118	19	7,53	2	68	73	15,49	2,20	171	79	27
0,50	20,01	113	17	7,77	0	67	72	15,99	2,10	171	79	26
0,50	20,01	87	15	7,82	0	73	76	15,99	2,00	173	80	27
0,00	30,02	146	30	7,77	0	63	67	14,49	2,30	166	76	27
0,00	30,02	109	23	7,89	0	65	71	15,49	2,00	172	79	27
0,00	34,2	102	18	7,69	0	68	72	15,99	2,10	175	81	27
0,00	34,2	81	13	7,71	0	71	73	15,99	1,90	177	81	27
4,50	24,28	55	9	7,72	2	77	76	15,99	2,00	182	84	27
4,50	24,28	46	7	7,71	2	78	77	15,49	1,90	183	84	26

Tabla 3.1.4 Agua potable

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. oC
0,00	24,27	8	2	7,96	0	57	70	17,73	1,40	177	82	23
0,00	24,27	7	1	7,73	0	59	74	17,73	1,40	182	84	25
0,00	17,01	6	1	7,86	0	62	81	17,73	1,40	194	90	26
0,00	17,01	5	0	7,92	0	64	80	18,22	1,50	187	86	26
0,00	14,94	3	0	7,75	0	63	81	18,22	1,60	187	86	26
0,00	14,94	2	0	7,63	0	65	86	20,19	1,30	187	86	25
5,40	16,76	6	0	7,82	0	66	87	19,70	1,30	184	84	25
5,40	16,76	7	0	7,87	0	68	84	17,73	1,50	186	86	25
0,00	17,47	5	0	7,74	0	63	74	18,22	1,40	187	86	24
0,00	17,47	3	0	7,87	0	63	81	17,52	1,50	189	87	24
2,50	14,31	3	0	7,75	0	61	80	17,23	1,50	179	82	25
2,50	14,31	17	3	7,86	0	61	81	17,23	1,60	182	84	25
0,00	21,87	40	5	7,97	0	59	81	15,26	2,00	175	81	25
0,00	21,87	65	8	7,85	0	57	72	14,77	2,40	155	71	24
10,30	20,38	61	8	7,85	0	53	74	15,75	2,20	160	74	25
10,30	20,38	20	3	7,72	0	56	72	14,77	1,90	158	73	25

Continuación Tabla 3.1.4 Agua potable

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. °C
3,00	17,82	11	1	7,8	0	63	83	16,25	1,80	177	82	26
0,20	17,62	5	0	7,84	0	63	88	16,25	1,70	174	81	26
0,20	17,62	5	0	7,95	0	63	76	16,75	1,50	179	82	25
27,50	15,99	9	2	7,97	1	64	77	16,74	1,60	181	83	26
27,50	15,99	5	0	8,04	2	65	83	16,74	1,40	177	82	24
0,00	18,13	5	1	8,05	2	65	88	17,73	1,30	172	79	24
0,00	18,13	3	0	7,98	0	64	82	17,23	1,40	164	76	25
1,50	15,87	2	0	7,72	0	62	78	17,23	1,30	169	77	24
1,50	15,87	4	0	7,95	1	62	82	18,22	1,50	178	81	25
13,00	17,86	4	0	7,82	0	69	82	16,74	1,60	184	84	23
13,00	17,86	4	0	7,9	1	68	84	17,23	1,40	187	86	26
10,50	15,83	5	0	7,72	0	65	83	16,74	1,70	187	86	25
10,50	15,83	5	0	7,57	0	61	77	16,74	1,80	174	80	25
14,20	14,36	4	0	7,57	0	60	83	16,74	1,80	176	81	25
14,20	14,36	4	0	6,4	0	63	83	17,73	1,60	173	79	25
0,00	20,11	4	0	7,74	0	67	85	17,24	1,50	180	82	25
0,00	20,11	3	0	7,95	0	68	86	18,72	1,40	189	87	26
4,50	17,65	2	0	7,89	0	71	90	17,73	1,60	189	87	26
4,50	17,65	3	0	7,81	0	72	89	18,22	1,40	183	84	25
5,50	17,07	5	1	7,98	1	71	85	17,73	1,60	187	86	25
5,50	17,07	3	0	8	1	71	86	17,23	1,50	187	86	25
0,00	15,42	4	0	7,66	0	59	82	15,76	1,50	171	79	26
0,00	15,42	4	0	7,72	0	61	80	18,22	1,50	164	75	25
4,50	23,89	4	0	7,75	0	62	82	16,25	1,70	174	81	25
4,50	23,89	5	0	7,82	0	62	81	17,23	1,70	185	85	25
2,20	21,46	4	0	7,83	0	70	91	18,29	1,90	187	86	25
2,20	21,46	3	0	7,86	0	72	93	17,23	1,70	192	88	25
19,00	20,52	5	1	7,69	0	55	77	17,23	1,50	171	79	23
19,00	20,52	4	0	7,83	0	54	75	17,23	1,50	184	84	24
2,50	22,22	4	0	7,8	0	61	79	18,22	1,50	177	81	25
2,50	22,22	4	0	7,85	0	61	81	18,22	1,50	184	85	25
2,30	21,54	5	0	7,8	0	61	83	18,22	1,50	180	83	25
2,30	21,54	4	0	8,05	2	62	69	15,26	2,40	145	67	25
2,50	21,06	4	0	7,82	0	60	79	18,22	1,70	178	82	26
2,50	21,06	5	0	7,92	0	66	87	17,73	1,60	181	83	26
0,00	28,42	6	1	7,72	0	43	65	20,20	1,90	139	64	26

Continuación Tabla 3.1.4 Agua potable

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. °C
3,20	32,32	4	0	7,94	0	56	84	16,74	1,60	169	78	24
4,40	20,17	4	0	7,9	0	58	85	15,26	1,40	173	80	26
4,40	20,17	4	0	7,99	1	67	87	18,71	2,30	188	86	26
21,00	20,7	4	0	8,01	1	69	86	18,86	1,90	188	85	25
21,00	20,7	5	2	8,02	0	69	87	17,73	1,70	186	85	25
0,00	17,36	1	0	7,82	0	51	64	17,73	1,20	163	74	23
0,00	17,36	3	0	7,92	0	55	70	17,23	1,20	167	77	23
2,50	17,74	3	0	7,91	0	60	72	18,22	1,20	167	77	24
2,50	17,74	2	0	7,77	0	58	72	17,23	1,30	167	77	24
0,00	16,87	2	0	7,56	0	56	72	18,22	1,30	156	72	24
0,00	16,87	2	0	7,79	0	58	75	17,23	1,40	167	77	24
0,00	17,15	2	0	7,61	0	60	73	17,23	1,40	159	74	24
0,00	17,15	2	0	7,5	0	53	72	17,23	1,40	163	75	24
0,00	14,16	3	0	7,58	0	59	73	19,21	1,30	173	79	24
0,00	14,16	1	0	7,67	0	60	76	17,23	1,40	171	79	24
0,00	18,71	4	0	7,63	0	61	74	16,74	1,40	172	79	24
0,00	18,71	2	0	7,76	0	60	70	17,73	1,30	184	84	24
0,00	23,56	2	0	7,55	0	62	73	15,76	1,40	173	80	24
0,00	23,56	2	0	7,41	0	62	75	16,25	1,40	172	79	24
0,00	23,52	4	0	7,61	0	64	80	17,24	1,60	173	80	25
0,00	23,52	3	0	7,76	0	62	78	16,74	1,40	176	82	25
2,50	20,42	4	0	7,76	0	63	79	18,22	1,60	177	82	24
2,50	20,42	5	0	7,66	0	62	78	18,22	1,50	178	82	24
0,00	22,59	3	0	7,66	0	61	76	18,72	1,30	183	84	24
0,00	22,59	3	0	7,45	0	46	77	17,23	1,30	171	79	24
0,00	26,29	4	1	7,71	0	51	75	15,26	1,60	167	77	24
0,00	26,89	4	0	7,91	0	53	72	15,76	1,50	155	71	23
60,40	51,89	3	0	7,95	0	55	74	17,23	1,40	165	76	24
60,40	51,89	2	0	7,88	0	57	75	18,16	1,30	176	81	24
25,50	15,94	1	0	7,68	0	60	76	19,64	1,40	177	82	24
25,50	15,94	3	0	7,52	0	60	76	17,67	1,40	177	82	24
8,20	19,01	3	0	7,86	0	62	76	17,61	1,40	170	78	24
8,20	19,01	3	0	7,79	0	53	78	16,63	1,40	172	79	23
0,00	28,04	2	0	7,76	0	52	77	17,61	1,40	167	76	24
0,00	28,04	2	0	7,78	0	51	76	17,12	1,30	164	76	24
200,50	20,89	3	1	7,49	0	58	80	18,66	1,20	165	76	22

Continuación Tabla 3.1.4 Agua potable

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. oC
57,50	42,66	19	3	7,44	0	37	68	12,80	2,70	176	81	22
1,50	63,87	16	1	7,54	0	37	72	14,25	2,70	176	81	23
1,50	63,87	14	2	7,62	0	38	76	15,18	2,50	174	81	23
4,70	36,83	6	0	7,63	0	48	76	16,14	2,10	170	78	23
4,70	36,83	4	0	7,82	1	48	77	15,70	2,40	174	81	23
0,00	22,73	2	0	7,7	0	48	77	15,76	1,40	171	79	24
0,00	22,73	3	0	7,66	0	54	77	17,24	1,30	176	81	23
17,50	23,49	2	0	7,65	0	58	75	17,23	1,30	172	79	24
17,50	23,49	1	0	7,61	0	60	90	18,71	1,20	183	84	24
9,50	20,88	2	0	7,38	0	60	76	17,21	1,50	157	72	23
9,50	20,88	3	0	7,42	0	44	70	17,21	1,70	130	60	23
32,00	28,49	3	0	7,59	0	39	63	16,60	1,80	129	59	23
32,00	28,49	7	0	7,62	0	45	67	17,12	1,80	152	70	23
14,50	32,44	3	0	7,6	0	47	66	17,12	1,90	138	64	24
14,50	32,44	4	0	7,63	0	46	63	17,12	1,80	132	61	23
6,20	29,41	5	2	7,59	0	59	66	18,63	2,00	153	71	25
6,20	29,41	4	0	7,66	0	43	63	16,20	1,50	156	72	23
2,00	42,69	3	0	7,6	0	51	62	15,52	1,40	161	74	24
2,00	42,69	3	0	7,77	0	58	72	17,89	1,30	172	79	24
0,20	24,59	3	0	7,94	0	66	84	18,15	1,70	180	83	24
0,20	24,59	4	0	7,99	0	65	84	17,14	1,60	185	85	24
47,50	26,38	3	0	7,94	0	66	84	18,15	1,70	180	83	24
47,50	26,38	4	0	7,99	0	65	84	17,14	1,60	185	85	24
40,30	21,17	3	0	7,75	0	57	72	16,11	1,80	161	74	24
40,30	21,17	3	0	7,69	0	50	71	17,95	1,50	148	68	23
2,50	35,45	3	0	7,66	0	51	78	17,48	1,40	172	74	24
2,50	35,45	3	0	7,78	0	50	70	17,60	1,50	145	66	23
2,50	35,66	3	0	7,82	0	47	68	17,57	1,40	161	74	24
2,50	35,66	2	0	7,73	0	53	74	17,64	1,30	174	80	23
0,00	21,05	1	1	7,55	0	60	83	18,79	1,25	172	79	23
0,00	21,05	2	0	7,42	0	55	66	17,73	1,20	151	69	23
2,50	23,36	3	0,33	7,46	0	58	75	17,30	1,30	155	72	23
2,50	23,36	1	0	7,6	0	59	77	18,29	1,20	169	77	23
0,00	13,45	3	0	7,73	0	55	75	17,68	1,20	149	69	24
0,00	13,45	2	0,33	7,53	0	55	77	17,15	1,10	155	71	23
0,00	14,33	2	0	7,37	0	63	82	17,67	1,30	156	72	23

Continuación Tabla 3.1.4 Agua potable

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. °C
0,00	14,98	2	0	7,3	0	67	83	18,62	1,20	166	77	24
0,00	20,28	1	0	7,43	0	60	73	17,60	1,40	166	76	24
0,00	20,28	2	0	7,6	0	61	76	18,05	1,40	179	82	24
0,00	26,09	4	0	7,26	0	46	68	16,60	1,40	147	68	24
0,00	26,09	4	0	7,39	0	41	67	16,60	1,40	136	63	24
0,00	29,87	3	0	7,38	0	42	68	16,10	1,40	129	59	23
0,00	29,87	2	0	7,41	0	42	73	18,61	1,30	148	68	22
0,00	23,63	3	0	7,55	0	54	68	18,61	1,30	154	71	24
0,00	23,63	2	0	7,47	0	54	74	17,60	1,20	164	75	23
14,50	20,71	2	0	7,43	0	58	75	16,10	1,20	167	77	25
14,50	20,71	2	0	7,74	0	63	77	16,60	1,40	170	78	23
8,20	24,42	5	0	7,82	0	68	73	14,09	1,70	154	71	23
8,20	24,42	1	0	7,82	0	68	71	13,99	1,70	155	72	22
0,00	22,42	2	0	7,4	0	61	83	15,88	1,30	177	81	22
0,00	22,42	1	0	7,54	0	59	79	16,87	1,40	170	79	22
6,20	17,48	1	0	7,39	0	60	78	18,22	1,20	160	74	24
6,20	17,48	2	0	7,51	0	63	79	17,73	1,20	170	78	24
0,00	11,5	2	0	7,32	0	63	80	18,49	1,20	157	72	25
0,00	11,5	1	0	7,32	0	61	77	19,49	1,15	153	70	25
0,00	15,2	1	0	7,57	0	61	76	17,49	1,10	173	79	25
0,00	15,2	1	0	7,64	0	60	78	17,30	1,10	177	81	25
0,00	16,7	2	0	7,58	0	56	80	16,99	0,90	173	80	26
0,00	16,7	2	0	7,66	0	57	80	18,99	1,10	178	82	24
0,00	15,52	2	0	7,52	0	58	77	18,49	1,20	171	80	26
0,00	15,52	2	0	7,51	0	54	78	17,99	1,20	169	78	26
0,00	15,15	1	0	7,3	0	51	72	17,49	1,30	170	78	24
0,00	15,15	2	0	7,38	0	52	72	17,99	1,30	169	77	24
0,00	15,47	2	0	7,43	0	54	74	17,99	1,10	172	79	25
0,00	15,47	2	0	7,36	0	53	73	17,99	1,20	171	79	25
32,00	51,63	29	4	7,6	0	33	74	17,49	1,70	165	76	24
32,00	51,63	25	3	7,55	0	32	73	15,99	1,70	155	71	24
0,00	50,1	12	2	7,49	0	29	69	15,99	1,70	165	76	24
0,00	50,1	30	3	7,62	0	30	64	15,99	1,80	153	70	22
14,00	29,77	17	2	7,66	0	29	71	15,99	1,80	151	69	24
14,00	29,77	6	0	7,94	0	40	69	16,99	1,40	156	72	24
0,00	30,38	2	0	7,99	0	42	69	17,49	1,30	167	76	24

Continuación Tabla 3.1.4 Agua potable

Precip. mL	Consumo Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color Pt/Co	Turb. NTU	pH	Alc. Parcial mg/L CaCO ₃	Alca. Total mg/L CaCO ₃	DT mg/L	Cloro mg/L	M.O mg/L	Conduc. (µs/cm ²)	STD mg/L	Temp. °C
58,50	24,21	2	0	7,75	1	52	76	15,99	1,50	172	80	25
0,00	21,42	2	0	7,69	0	45	65	18,49	1,20	168	77	26
0,00	21,42	2	0	7,55	0	56	71	17,99	1,10	179	83	25
3,20	20,92	2	0	7,42	0	59	76	17,49	1,10	179	82	26
3,20	20,92	1	0	7,43	0	60	81	17,99	1,10	179	82	26
38,50	21,93	3	0	7,7	0	52	75	17,99	0,70	163	74	26
38,50	21,93	4	0	7,66	0	47	68	17,49	1,00	150	70	25
2,20	58,2	7	1	7,65	0	43	66	19,49	0,90	166	76	25
2,20	58,2	22	5	7,61	0	39	84	17,99	1,2	181	83	24
0,00	71,3	8	0	7,59	0	46	102	17,99	1,0	233	108	26
0,00	71,3	4	0	7,62	0	53	91	18,21	1,20	211	97	25
0,00	52,34	3	0	7,56	0	54	80	17,73	0,90	207	96	26
0,00	52,34	2	0	7,63	0	57	76	20,48	1,00	180	82	25
4,20	30,17	1	0	7,7	0	57	74	18,99	0,90	186	85	26
4,20	30,17	2	0	7,1	0	59	75	17,99	0,90	183	85	26
0,00	39,64	1	0	7,48	0	57	76	16,99	1,20	182	84	28
0,00	39,64	1	0	7,41	0	60	78	18,99	1,00	180	83	25
10,50	35,16	3	0	7,38	0	61	79	19,49	1,00	190	87	27
10,50	35,16	1	0	7,56	0	68	77	19,98	1,00	190	87	26
16,80	30,26	2	0	7,79	0	58	80	19,48	1,10	195	89	26
16,80	30,26	4	0	7,8	0	63	83	18,49	1,10	197	91	26
0,00	28,02	2	0	7,7	0	68	84	18,49	1,10	199	92	26
0,00	28,02	4	0	7,66	0	67	83	17,99	1,10	200	93	25
0,00	27,53	2	0	7,43	0	69	87	17,49	1,10	197	90	26
0,00	27,53	3	0	7,61	0	69	84	17,99	1,00	204	95	26
2,30	20,2	3	0	7,59	0	69	87	17,99	1,30	197	91	26
2,30	20,2	2	0	7,38	0	69	86	18,49	1,20	193	89	26
0,00	23,15	2	0	7,42	0	68	84	18,49	1,50	188	86	28
0,00	23,15	2	0	7,7	0	63	79	18,49	1,50	178	82	26
2,20	26,06	2	0	7,66	0	64	84	18,49	1,40	193	89	28
2,20	26,06	2	0	7,53	0	68	85	19,98	1,30	200	92	28
5,00	25,89	2	0	7,61	0	72	83	16,99	1,30	203	93	28
5,00	25,89	2	0	7,59	0	71	80	17,99	1,20	198	91	27
0,00	25,48	2	0	7,55	0	73	83	16,99	1,30	202	93	28
0,00	25,48	3	0	7,42	0	71	80	17,99	1,30	194	89	26
0,00	21,96	2	0	7,7	0	72	82	17,99	1,30	197	91	27

Continuación Tabla 3.1.4 Agua potable

0,00	23,36	3	0	7,6	0	70	84	17,99	1,30	183	84	27
0,00	21,71	4	0	7,26	0	67	87	17,99	1,40	200	92	28
0,00	21,71	2	0	7,61	0	67	86	18,99	1,20	196	90	28
0,00	22,08	2	0	7,42	0	67	84	19,99	1,40	190	88	28
0,00	22,08	2	0	7,7	0	69	83	20,48	1,30	186	86	26
0,00	29,89	2	0	7,6	0	66	80	18,99	1,10	191	88	26
0,00	29,89	1	0	7,39	0	69	83	20,48	1,10	195	89	26
0,00	27,96	1	0	7,38	0	66	83	17,99	1,10	192	88	27
0,00	27,96	1	0	7,41	0	64	85	18,49	1,10	196	90	27
2,20	20,22	1	0	7,74	0	68	81	17,99	1,40	186	85	27
2,20	20,22	2	0	7,49	0	70	81	18,49	1,60	187	86	27
0,50	20,01	3	0	7,6	0	71	80	17,99	1,40	189	87	26
0,50	20,01	3	0	7,43	0	69	83	17,99	1,40	194	90	27
0,00	30,02	3	0	7,57	0	65	76	16,49	1,60	199	92	27
0,00	30,02	1	0	7,62	0	68	76	17,99	1,50	200	92	27
0,00	34,2	2	0	7,83	0	69	77	17,99	1,50	194	90	27
0,00	34,2	1	0	7,66	0	69	77	17,99	1,40	184	85	27
4,50	24,28	2	0	7,44	0	72	81	17,99	1,40	198	91	27
4,50	24,28	1	0	7,52	0	74	83	17,99	1,40	201	94	26