



**DEPARTAMENTO DE POSGRADOS**  
**MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL V VERSIÓN**

**Estudio de la remoción de manganeso y hierro en el módulo II de la  
Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tixán**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de Magíster en Gestión  
Ambiental**

**AUTOR:**

**CHRISTIAN DAVID SÁNCHEZ MERCHÁN**

**DIRECTOR:**

**EDWIN JAVIER ZÁRATE HUGO**

**CUENCA, ECUADOR**

**2020**

## DEDICATORIA

*Este trabajo se lo dedico a mis padres, quienes con su apoyo y amor incondicional han estado siempre a mi lado. A Leonardo, por inculcarme el valor de la honestidad y brindarme la enseñanza de que el trabajo duro y honrado es siempre el más gratificante. A Fanny, por dejarme presenciar el significado de amor, fortaleza y compromiso en una sola palabra: mamá.*

*Gracias por todas sus enseñanzas y consejos a lo largo de vuestras vidas; hoy pueden decir que su tarea está cumplida.*

*A mis hermanos, Andrés y Mateo, por siempre ser el motivo de mi sonreír diario y por recordarme que la familia es el mejor lugar para compartir.*

*A mi abuelita, quien con su ejemplo y dedicación me sigue enseñando que la vida es bella sin importar los momentos difíciles que podamos atravesar.*

*A mi moskita toy, quien en su inocencia me recuerda cada día que nuestros límites son aquellos que nosotros mismos nos establecemos y que se cumplirán si nunca dejamos de creer y soñar.*

*A mis tíos, Diego, Anita y Dolores, gracias por sus palabras de aliento en aquellos momentos difíciles, por las risas en las reuniones familiares y por convertirse en un ejemplo y modelo de buenas personas.*

*Finalmente, dedico este trabajo al ser divino que me dio la vida, a Dios, quien ha guiado mis pasos por los momentos más difíciles, devolviéndome la esperanza para poder continuar y permitiéndome llegar a este punto importante de mi vida.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Director de Tesis, Edwin Zárate, por sus aportes, correcciones y enseñanzas a lo largo de todo el tiempo dedicado a la ejecución del presente trabajo.

Al Jefe de Planta de Tixán, Ing. Juan Diego Espinoza, quien amablemente facilitó los datos requeridos en la investigación y permitió el acceso para realizar las diferentes pruebas de campo desarrolladas.

De igual modo, un agradecimiento especial a todo el personal del Laboratorio de Agua Potable de ETAPA EP, principalmente a la Ing. Andrea Arévalo Molina; su experiencia y conocimiento han sido fundamentales para el éxito de esta investigación.

## RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de la investigación sobre la dosis eficiente de permanganato de potasio que debe ser aplicada en el agua cruda que ingresa a la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tixán con la finalidad de remover manganeso y hierro, metales que se encuentran presentes en el agua y que causan depósitos en el sistema de abastecimiento. Para este fin, seis dosis de permanganato, correspondientes a 120, 240, 300, 400, 450 y 500  $\mu\text{g/l}$  fueron probadas. Los resultados indican que la dosis óptima para remover manganeso y hierro es de 500  $\mu\text{g/l}$ , con porcentajes de remoción del cien por ciento. Así mismo, se logró determinar que la concentración de estos metales no tiene relación directa con el caudal del agua que ingresa a la Planta, por lo tanto, es posible establecer una dosis única de permanganato que funcione independientemente del caudal. De esta manera se logra eliminar problemas relacionados con la presencia de estos metales en el agua de consumo.

**Palabras clave:** agua potable, hierro, manganeso, permanganato de potasio, remoción, tanque de oxidación

## ABSTRACT

This article presents the results of a research about the efficient dose of potassium permanganate applied in the raw water that enters the Tixán's Drinking Water Treatment Plant to remove manganese and iron, metals found in water, which cause deposits in the water supply system. For this purpose, six doses of permanganate, corresponding to 120, 240, 300, 400, 450 and 500  $\mu\text{g/l}$  were tested. The results show that the optimal dose to remove manganese and iron was 500  $\mu\text{g/l}$ , with a one hundred percent removal rate. Likewise, it was possible to determine that the concentration of these metals has no direct relationship with the flow of water entering the plant. Therefore, it was possible to establish a single dose of permanganate to work regardless the flow. This way it is possible to eliminate problems related to the presence of these metals in drinking water.

**Keywords:** drinking water, iron, manganese, potassium permanganate, removed, oxidation tank

Translated by



Christian David Sánchez Merchán

**INDICE DE CONTENIDO**

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	3
2.1 Área de estudio .....	3
Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tixán .....	3
Origen de manganeso y hierro en la fuente de abastecimiento .....	4
2.2 Tratamiento de datos.....	4
2.3 Modelo lineal que permitirá obtener la dosificación de $\text{KMnO}_4$ con respecto al caudal de ingreso y contenido de Mn .....	5
2.4 Diseño Experimental .....	5
2.5 Recolección de muestras .....	6
2.6 Análisis de las muestras.....	7
3. RESULTADOS.....	8
3.1 Análisis histórico de la concentración de manganeso .....	8
Boxplot .....	8
Análisis de Varianza (ANOVA) .....	10
3.2 Remoción de manganeso y hierro probando las diferentes dosis de $\text{KMnO}_4$ .....	11
3.3 Porcentaje de remoción.....	13
3.4 Modelo lineal .....	14
4. DISCUSIÓN .....	16
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	19
6. REFERENCIAS .....	20
7. ANEXOS .....	23

### INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diseño Experimental .....	6
Tabla 2. Puntos de toma de muestra .....	7
Tabla 3. Valor máximo y mínimo de manganeso registrado en el análisis histórico .....	10
Tabla 4. ANOVA de los registros de manganeso .....	10
Tabla 5. Límite permitido de manganeso y hierro en el agua de consumo .....	12
Tabla 6. Porcentaje de remoción y efectividad del tratamiento .....	14
Tabla 7. Método gravimétrico en el tanque dosificador .....	15
Tabla 8. Dosificación de $\text{KMnO}_4$ considerando el caudal de ingreso y la concentración de Mn .....	23

### INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Planta de Tixán y de la cuenca del río Machángara .....	3
Figura 2. Diseño del módulo II de la Planta de Tixán y ubicación de los seis puntos de muestreo .....	6
Figura 3. Variación de la concentración en $\mu\text{g/l}$ de Mn según el Caudal correspondiente al año 2018 .....	8
Figura 4. Variación de la concentración en $\mu\text{g/l}$ de Mn según el Caudal correspondiente al año 2019 .....	8
Figura 5. Contenido de Mn mensual registrado en el año 2018 .....	9
Figura 6. Contenido de Mn mensual registrado en el año 2019 .....	9
Figura 7. Remoción de Mn y Fe a una dosis de $120 \mu\text{g/l}$ de $\text{KMnO}_4$ .....	11
Figura 8. Remoción de Mn y Fe a una dosis de $240 \mu\text{g/l}$ de $\text{KMnO}_4$ .....	11
Figura 9. Remoción de Mn y Fe a una dosis de $300 \mu\text{g/l}$ de $\text{KMnO}_4$ .....	11
Figura 10. Remoción de Mn y Fe a una dosis de $400 \mu\text{g/l}$ de $\text{KMnO}_4$ .....	11
Figura 11. Remoción de Mn y Fe a una dosis de $450 \mu\text{g/l}$ de $\text{KMnO}_4$ .....	12
Figura 12. Remoción de Mn y Fe a una dosis de $500 \mu\text{g/l}$ de $\text{KMnO}_4$ .....	12
Figura 13. % Remoción – dosis $120 \mu\text{g/l}$ .....	13
Figura 14. % Remoción – dosis $240 \mu\text{g/l}$ .....	13
Figura 15. % Remoción – dosis $300 \mu\text{g/l}$ .....	13
Figura 16. % Remoción – dosis $400 \mu\text{g/l}$ .....	13
Figura 17. % Remoción – dosis $450 \mu\text{g/l}$ .....	14
Figura 18. % Remoción – dosis $500 \mu\text{g/l}$ .....	14
Figura 19. Curva de Dosificación de $\text{KMnO}_4$ con respecto a las RPM del tornillo sinfín. ....	15

Christian David Sánchez Merchán

Trabajo de Graduación

Edwin Javier Zárate Hugo

Septiembre, 2020

## **Estudio de la remoción de manganeso y hierro en el módulo II de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tixán**

### **1. INTRODUCCIÓN**

El agua es esencial para el desarrollo de la vida y su acceso debe estar garantizado por parte del Estado para todas las personas; su mejora y calidad brindan, en términos de agua para consumo humano, beneficios tangibles para la salud (Organización Mundial de la Salud, 2006). Las causas de la actual crisis mundial en lo que respecta al acceso y calidad del agua, se debe principalmente a ciertos factores como la pobreza, las desigualdades de poder, las políticas erróneas en la gestión del agua o la falta de gobernabilidad (Sanz, Lombraña, & De Luis, 2013). En este contexto, la lucha por la dignidad y derechos humanos es de vital importancia para el desarrollo económico, preservación y fortalecimiento de los estándares de salud humana y para la protección ambiental del planeta (Sánchez Merchán, 2018).

Según cifras del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) el 40% de la población mundial es afectado por la escasez de alrededor del mundo (Gallo Aponte, 2019). Para combatir esta problemática, el Ecuador ha emprendido ciertas reformas, al igual que otros países de América Latina, con el fin de asegurar la dotación de servicios básicos (Oblitas De Ruiz, 2010). A consecuencia de esta reforma, en algunas regiones, las inversiones en sistemas de abastecimiento de agua potable han permitido la disminución de enfermedades hídricas, razón por la cual, debe realizarse el máximo esfuerzo para lograr que la inocuidad del agua de consumo se encuentre garantizada y sea la mayor posible (Organización Mundial de la Salud, 2006).

Por este motivo, la calidad del agua potable es un factor esencial para la salud humana pues sus características pueden favorecer tanto la prevención, así como la transmisión de agentes patógenos que alteran el bienestar de las personas y causan enfermedades (Briñez A, Guarnizo G, & Arias V, 2012). Por tal motivo, los criterios de calidad para agua de consumo han sido desarrollados considerando el empleo de agua sin la acción tóxica de contaminantes, debido a que en las últimas tres décadas se incrementó el uso de productos químicos empleados en la industria, agricultura, ganadería y medicina (Fernández Cirelli, 2012). El Servicio Ecuatoriano de Normalización (2020), establece que el agua potable es el líquido vital cuyas características físicas, químicas y microbiológicas han sido tratadas con el objetivo de garantizar su aptitud para consumo humano. Del mismo modo, la Organización Mundial de la Salud (2006) define al

agua de consumo como aquella que no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud cuando se ingiere durante toda una vida.

Sin embargo, la presencia de constituyentes químicos, de origen natural o antropogénico, que se encuentren presentes en el agua en concentraciones superiores a los establecidos por las normativas vigentes, son definidos como contaminantes y desvirtúan el carácter de inocuidad del agua potable. Por lo tanto, su presencia disminuye el índice de calidad del agua y trae consigo efectos negativos sobre la ecología y el desarrollo de la vida humana (Belizario Quispe, Capacoila Coila, Huaquisto Ramos, Cornejo Olarte, & Chui Betancur, 2019).

De este modo, la calidad del agua puede verse afectada también por la acción de elementos inorgánicos, tales como el manganeso (Mn) y el hierro (Fe), los cuales se encuentran en abundancia en la corteza terrestre (Palavecino Alvarez, 2009) y producen problemas sobre la aceptabilidad del agua, por tal motivo se debe fijar prioridades para su remoción (Organización Mundial de la Salud, 2006). El análisis de los niveles de Mn y Fe, en las aguas naturales que son utilizadas posteriormente en sistemas de potabilización, resulta importante debido a que altas concentraciones pueden causar diversos problemas en el tratamiento, tales como una mayor demanda en los procesos de filtración o construcción e instalación de equipos para su remoción (Seisdedo Losa, Diaz Asencio, Castellanos Torres, & Arencibia Carballo, 2015).

Por lo tanto, el artículo que aquí se presenta está basado en el estudio de la remoción de Mn y Fe, mediante un proceso de oxidación química con permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) y aeración, en el agua cruda que sirve como abastecimiento a la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Tixán, en la ciudad de Cuenca, Ecuador. La presencia de estos contaminantes se produjo por el derrumbe que tuvo lugar en la quebrada del Soroché en el año 2001, lo cual originó una disminución notable del índice de calidad del río Machángara, el cual es utilizado por la Planta de Tixán para la producción de agua de consumo. Debido a este fenómeno natural, el sistema de distribución de agua potable empezó a tener problemas por la precipitación de óxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ), el cual es el responsable de otorgarle color al agua, es decir, brinda un efecto estético indeseable del producto.

Para disminuir o mitigar la problemática existente, el módulo I de la PTAP de Tixán tiene un sistema de dosificación de  $\text{KMnO}_4$  a una concentración de  $700 \mu\text{g/l}$ , sin embargo, esta aplicación del químico no considera la acción o desempeño del tanque de oxidación que presenta el módulo II de la Planta. Dicho tanque presenta también aereadores con el objetivo de favorecer o ayudar a la oxidación de manganeso y hierro que están presentes en el agua. Por consiguiente, la presente investigación involucra, la determinación de la dosis de permanganato que deberá ser administrada al agua cruda para reducir al mínimo los niveles de concentración de los metales antes mencionados. De esta manera se contribuye al adecuado funcionamiento del sistema de tratamiento, generando un producto que no presente trazas de metales que generen un rechazo por parte de los consumidores al otorgarle un efecto estético indeseable.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Área de estudio

#### *Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tixán*

La PTAP de Tixán está ubicada en el sector rural que lleva el mismo nombre, perteneciente a la parroquia Chiquintad, en las coordenadas WGS84 X = 723118 Y = 9686744, a una altitud de 2690 m.s.n.m (ETAPA EP, 2016). Su fuente de abastecimiento es el río Machángara, cuya cuenca hidrográfica ocupa un territorio de 32500 hectáreas y la cual se encuentra regulada en la zona alta por los embalses de Chanlud y Labrado, que son utilizadas por las centrales hidroeléctricas de Saucay y Saymirín respectivamente (ETAPA EP, 2015). El 77% de la superficie de la cuenca del río se encuentra dentro de la categoría de Área de Bosque y Vegetación Protectora Machángara – Tomebamba (Díaz Granda, 2018)

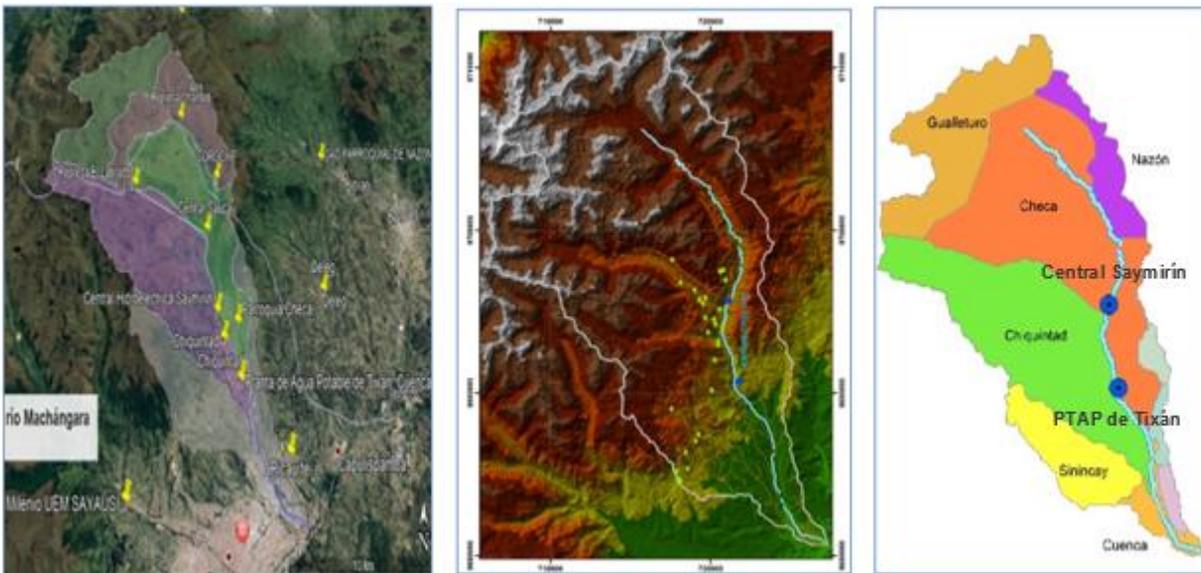


Figura 1. Localización de la Planta de Tixán y de la cuenca del río Machángara

El módulo I de la Planta presenta una capacidad nominal de 1000 l/s, y abastece del líquido vital a una fracción aproximadamente del 44% de la ciudad de Cuenca. Su construcción finalizó en abril de 1996. A partir del año 2008 se opera en la Planta un proceso de oxidación química para la remoción de Mn y Fe, mediante la dosificación de  $\text{KMnO}_4$ , aplicado en solución al ingreso del agua cruda. La dosis de permanganato empleado en la PTAP es constante y el valor establecido es de 700  $\mu\text{g/l}$ .

En lo que respecta al segundo módulo de la PTAP, ésta cuenta también con una capacidad nominal de 1000 l/s y su construcción finalizó en marzo del 2019. El sistema de tratamiento de los módulos I y II involucra una tecnología de ciclo completo integrado por las etapas de captación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y su posterior distribución. Sin embargo, el proceso de oxidación química antecede al ciclo convencional de tratamiento.

### *Origen de manganeso y hierro en la fuente de abastecimiento*

La quebrada del Soroche es un afluente del río Machángara y está situada en la margen izquierda de la cuenca media-alta de este río. En junio del año 2001, entre las cotas 3200 y 3500 m.s.n.m de la quebrada, se originó un deslizamiento de tierra con el consiguiente depósito de material detrítico, aproximadamente de 700000 m<sup>3</sup>, a lo largo del cauce hasta alcanzar el río Machángara (ETAPA EP, 2015).

En los siguientes años los deslizamientos de tierra continuaron, viéndose de esta manera deteriorada la calidad de agua del río Machángara, generando serios problemas en la producción de agua potable en la PTAP de Tixán y en la generación hidroeléctrica en la central de Saymirín (ETAPA EP, 2015).

En el año 2003 y en base a los estudios realizados por el Consejo de la Cuenca del Río Machángara dirigidos a reducir los impactos generados por los deslizamientos en la quebrada del Soroche, ELEC AUSTRO construyó un “bypass” en el río Machángara justo antes de su unión con el río Chulco. El objetivo principal de esta acción implementada fue desviar el caudal cargado de sólidos y partículas en suspensión, que luego es vertido aguas debajo de la captación de la central hidroeléctrica Saymirín, para evitar problemas de operación en las turbinas de esta central. Del mismo modo, la PTAP de Tixán se ve beneficiada, pues solamente recibe las aguas turbinadas de Saymirín que se caracterizan por no contener grandes concentraciones de sólidos (ETAPA EP, 2015). Sin embargo, existe la presencia de Mn y Fe, que si bien no afectan negativamente la salud de las personas provocan serios problemas en la dotación de agua potable y en los sistemas de abastecimiento.

## **2.2 Tratamiento de datos**

La presente investigación ha tomado únicamente los datos correspondientes a la concentración de manganeso, debido a que es el elemento más difícil de remover en relación al hierro y, además, una vez que se conoce la dosis óptima de permanganato para oxidar el Mn, es posible determinar mediante estequiometría, las partes de oxidante requeridas para oxidar también el Fe. Por lo tanto, los datos aquí presentados se centran en el registro histórico que presenta la PTAP de Tixán en sus últimos dos años, tanto en la concentración de Mn, así como también el caudal de entrada de agua cruda.

El objetivo de este análisis histórico consiste en estudiar el comportamiento del Mn con relación al caudal de agua que ingresó a la Planta, y determinar las concentraciones máximas y mínimas de este metal a lo largo de estos últimos dos años y, verificar si existe una relación directa entre estas dos variables. Para lograr este fin, se utilizará estadística descriptiva e inferencial.

Mediante la estadística descriptiva se presentarán los resultados obtenidos del análisis histórico en Figuras y diagramas Boxplot, los cuales reflejarán el comportamiento de los niveles de Mn según los caudales de entrada. Además, mediante el análisis de varianza (ANOVA) será posible determinar si existe o no diferencias significativas entre los grupos de estudio. En adición, a través de la visualización de

Histogramas, se evidenciarán los resultados obtenidos al trabajar con distintas dosis de permanganato de potasio (Rendón Macías, Mario Enrique Villasís Keever & Miranda Novales, 2016).

En cambio, a través de la estadística inferencial se determinará la dosis óptima de  $\text{KMnO}_4$  requerida para el adecuado funcionamiento del tanque de oxidación que presenta la Planta, esto a partir de las pruebas que se realizan con los datos obtenidos de una muestra de la población (Flores Ruiz, Miranda Novales, & Villasís Keever, 2017). Específicamente, se realizará el estudio sobre el aforo del tanque dosificador de permanganato, el cual permitirá obtener un modelo lineal ajustado cuyo objetivo principal es predecir valores. En este sentido, se establecerá el volumen de permanganato, determinado a través de las Revoluciones Por Minuto a las que deberá girar el tornillo sinfín del tanque considerando el caudal de agua que este ingresando a la Planta y el contenido de Mn que presente el agua cruda.

### **2.3 Modelo lineal que permitirá obtener la dosificación de $\text{KMnO}_4$ con respecto al caudal de ingreso y contenido de Mn**

En un modelo de regresión lineal simple se establece la relación que existe entre la variable respuesta Y, y una única variable explicativa X. En otras palabras, permite encontrar la fuerza o magnitud de cómo se relacionan las dos variables (Reding Bernal, Zamora Macorra, & López Alvarenga, 2011). La ecuación que obedece este modelo es la siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

Donde Y son los valores correspondientes al eje vertical,  $\beta_0$  es la ordenada al origen,  $\beta_1$  es la pendiente, y X son los valores correspondientes al eje horizontal. Por lo tanto, el modelo de regresión lineal simple permite estimar o predecir el valor de la variable de respuesta a partir de un valor dado a la variable explicativa (Brenes González, 2017).

Por lo tanto, en el análisis que aquí se presenta, la variable explicativa serán los g/s de permanganato que caen de acuerdo las revoluciones a las que gire el tornillo sinfín que presenta el tanque dosificador, siendo las RPM del tornillo la variable respuesta. El modelo lineal obtenido tras este análisis permite determinar el volumen de permanganato necesario para oxidar y remover las partes de Mn y Fe que se encuentren en el agua que ingresa al sistema de tratamiento de la Planta.

### **2.4 Diseño Experimental**

Una vez realizado el análisis histórico y, tras obtener los valores máximos y mínimos correspondientes al contenido de Mn, se trabajará con cinco dosis diferentes de  $\text{KMnO}_4$ . Las concentraciones establecidas de  $\text{KMnO}_4$  para ser evaluadas, incluyen también las partes requeridas para la remoción de hierro y, provienen del estudio presentado en la sección Resultados.

Tabla 1. Diseño Experimental

DOSIS DE $KMnO_4$
120 $\mu g/l$
240 $\mu g/l$
300 $\mu g/l$
400 $\mu g/l$
450 $\mu g/l$
500 $\mu g/l$

### 2.5 Recolección de muestras

El proceso de toma de muestras se efectuará en los sitios de muestreo previamente establecidos. A continuación, se detalla la ubicación de cada uno de ellos, de acuerdo al diseño de la Planta.

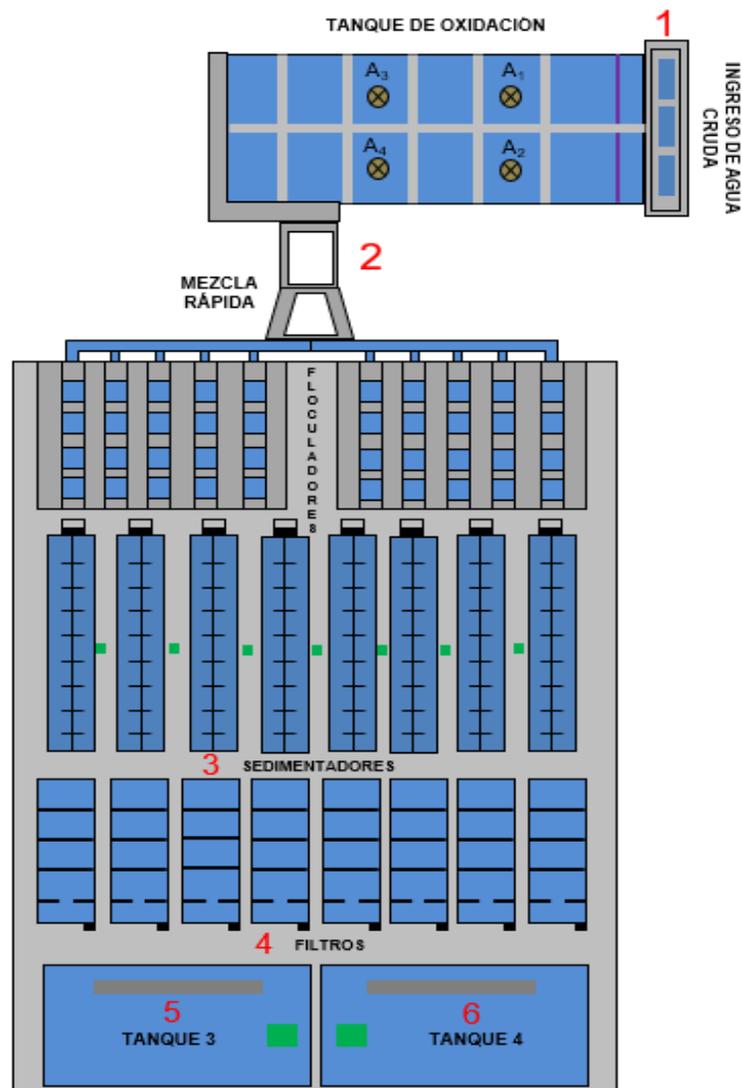


Figura 2. Diseño del módulo II de la Planta de Tixán y ubicación de los seis puntos de muestreo

En la Tabla 2 se explica la descripción de cada punto establecido para realizar el proceso de toma de muestras.

Tabla 2. Puntos de toma de muestra

<b>PUNTO DE MUESTREO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
1	Ingreso del agua cruda
2	Salida del tanque de oxidación
3	Sedimentadores
4	Filtros
5	Tanque 3
6	Tanque 4

## 2.6 Análisis de las muestras

El análisis de Mn y Fe realizado en el Área de Absorción Atómica, dentro del Laboratorio de Agua Potable de ETAPA EP, está basado y fundamentado en el Standard Methods, sección 3111B, en su Edición 23, y sigue el Procedimiento Específico desarrollado por el Laboratorio de Agua Potable, PE 3.1 y PE 3.2, para la determinación de manganeso y hierro respectivamente.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Análisis histórico de la concentración de manganeso

Los datos anuales de la variación del contenido de Mn de acuerdo al caudal que ingresa a la Planta se puede ver en las Figuras 3 y 4, para los años 2018 y 2019 respectivamente.

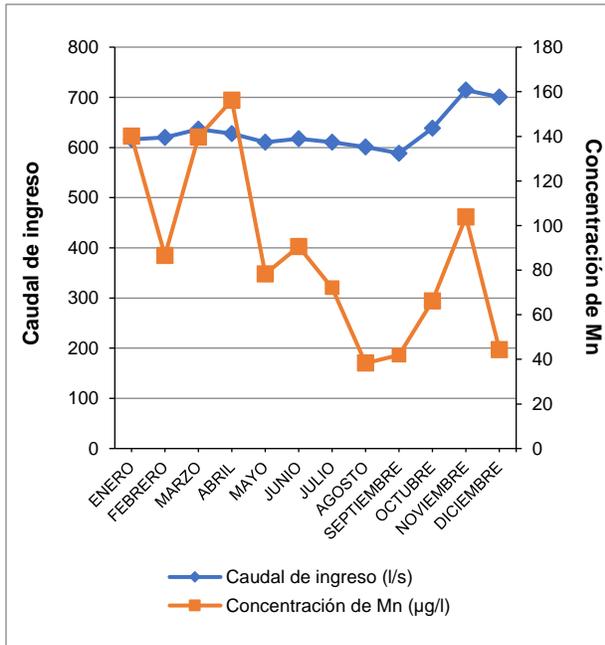


Figura 3. Variación de la concentración en µg/l de Mn según el Caudal correspondiente al año 2018

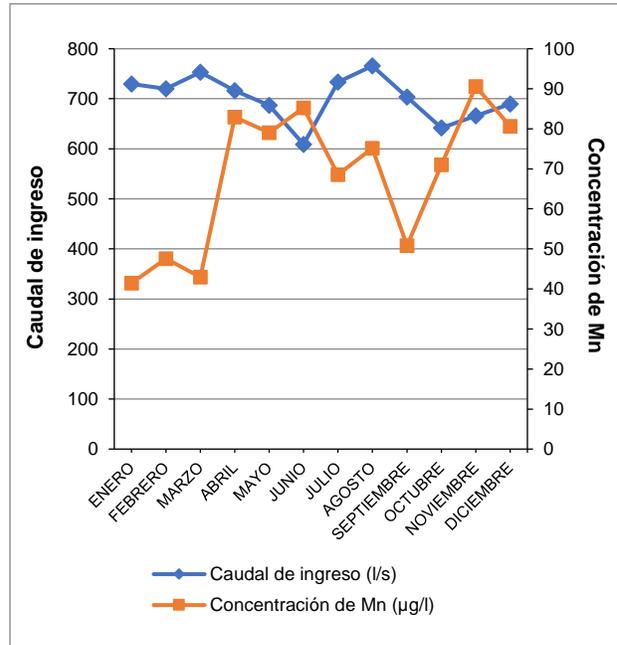


Figura 4. Variación de la concentración en µg/l de Mn según el Caudal correspondiente al año 2019

Al analizar la Figura 2 y 3 es posible establecer que no existe una dependencia directa entre la concentración de Mn y el caudal de ingreso de agua cruda.

#### Boxplot

A continuación, se presenta un análisis del contenido de Mn mensual registrado en los dos años correspondientes al estudio. Las siguientes figuras, presentadas en forma de boxplot (diagrama de cajas), permiten visualizar la distribución de datos continuos unimodales (Hubert & Vandervieren, 2008) y, presentan un resumen de cinco números: el rango de valores máximos y mínimos, los cuartiles superiores e inferiores y la mediana (Bruffaerts, Verardi, & Vermandele, 2014).

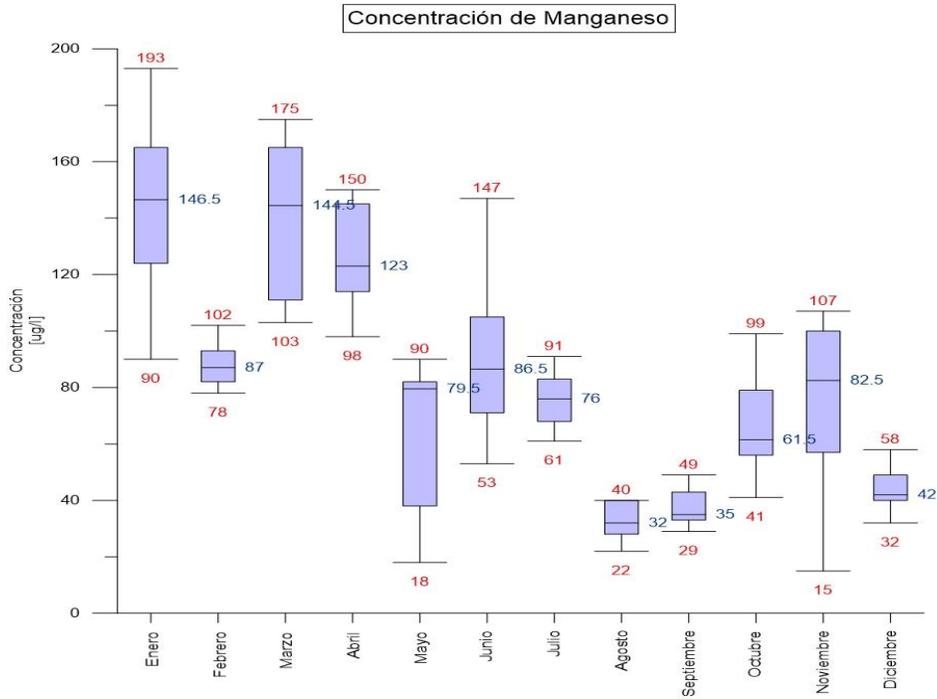


Figura 5. Contenido de Mn mensual registrado en el año 2018

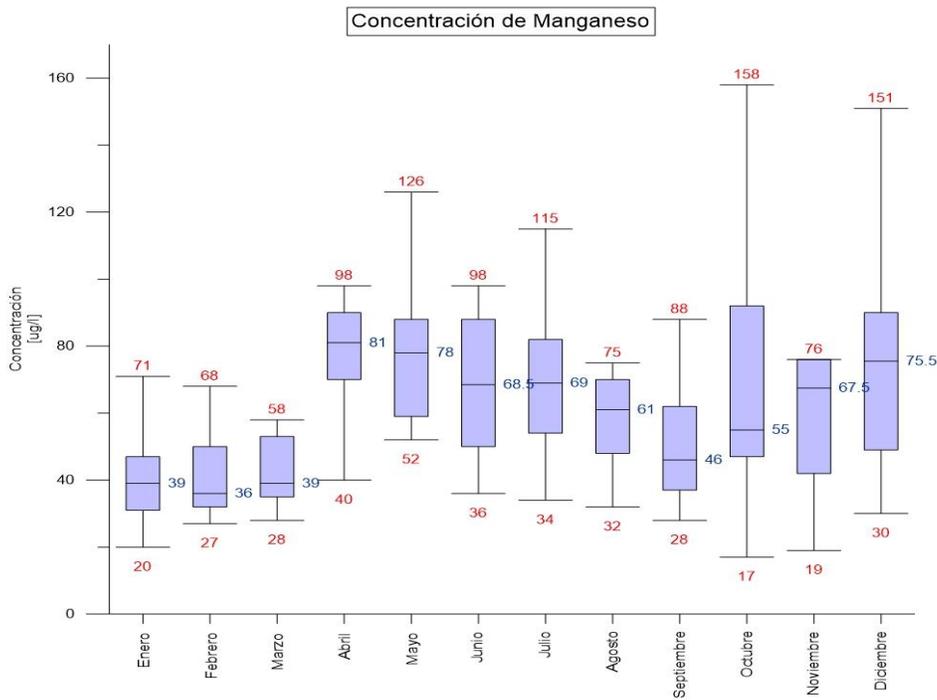


Figura 6. Contenido de Mn mensual registrado en el año 2019

De la misma forma, al analizar las Figuras 5 y 6, no es posible evidenciar un comportamiento del contenido de Mn con respecto a los diferentes meses del año, por consiguiente, el contenido de Mn depende de la carga de sólidos con la que se encuentre el agua cruda en ese momento.

Mediante el análisis estadístico presentado anteriormente, se puede evidenciar cuáles son los picos máximos y mínimos en la concentración de Mn que se han presentado en el tiempo de estudio. Por lo tanto, el análisis del registro histórico permite obtener los siguientes valores, presentados en la siguiente Tabla.

Tabla 3. Valor máximo y mínimo de manganeso registrado en el análisis histórico

Denominación	Mn ( $\mu\text{g/l}$ )
Máximo	193
Mínimo	15

Estos valores nos permiten obtener una dosis inicial o de partida de  $\text{KMnO}_4$  para realizar las respectivas pruebas de campo. De este modo la dosificación de permanganato obedecerá a un solo valor, independientemente del caudal al que la planta este trabajando.

#### *Análisis de Varianza (ANOVA)*

El ANOVA es una prueba estadística que permite realizar simultáneamente la comparación de las medias de dos o más poblaciones (Rubio Hurtado & Berlanga Silvente, 2012). En este caso de estudio, se requiere comparar las medias de los valores de manganeso mensual del registro histórico en estos dos años de estudio. Los resultados se detallan en la siguiente Tabla.

Tabla 4. ANOVA de los registros de manganeso

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	436909,74	23	18996,08	7,05	7,75E-19	1,55
Dentro de los grupos	1134943,55	421	2695,83			
Total	1571853,29	444				

Mediante estos resultados, la hipótesis nula, que sostiene que no existe variabilidad significativa entre las medias de todos los grupos, queda descartada debido a que el valor de F calculado (7.05) es mayor que el valor de F crítico o tabulado (1.55). Además, mediante la interpretación de P (7,75E-19), se observa que este valor es menor a 0.05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y es posible concluir que no todas las medias de la población son iguales.

### 3.2 Remoción de manganeso y hierro probando las diferentes dosis de KMnO4

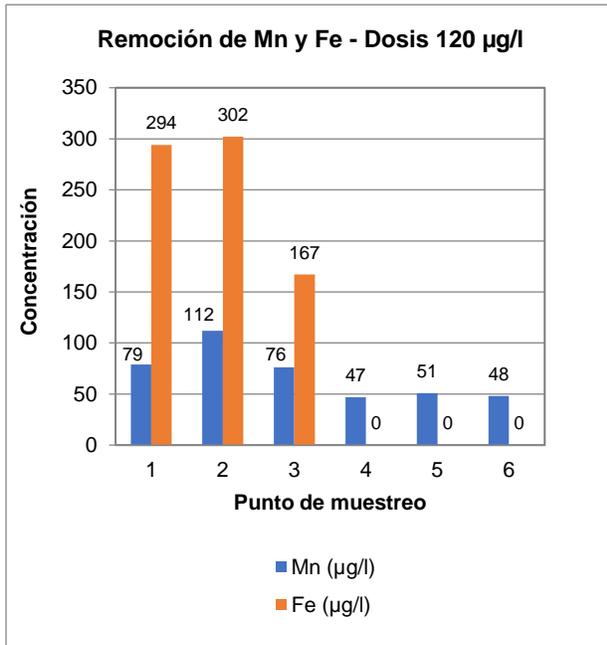


Figura 7. Remoción de Mn y Fe a una dosis de 120 µg/l de KMnO4

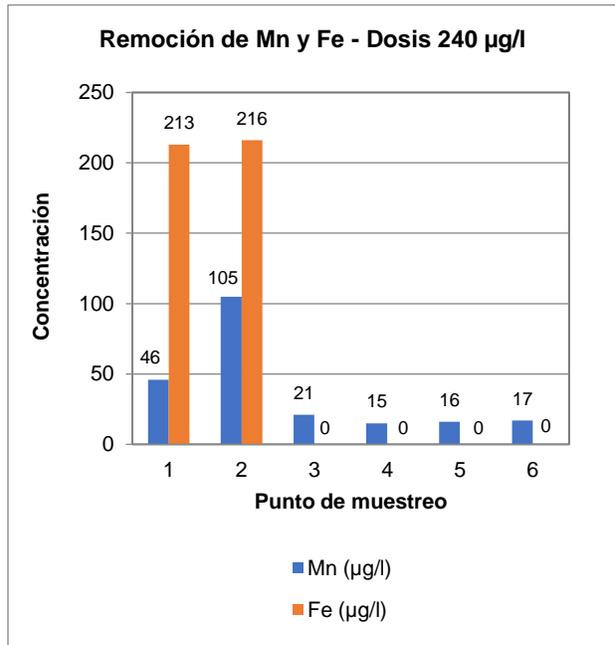


Figura 8. Remoción de Mn y Fe a una dosis de 240 µg/l de KMnO4

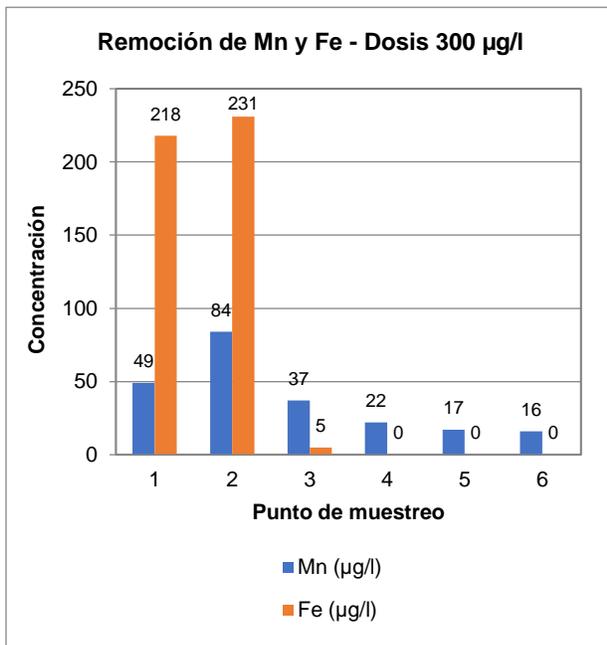


Figura 9. Remoción de Mn y Fe a una dosis de 300 µg/l de KMnO4

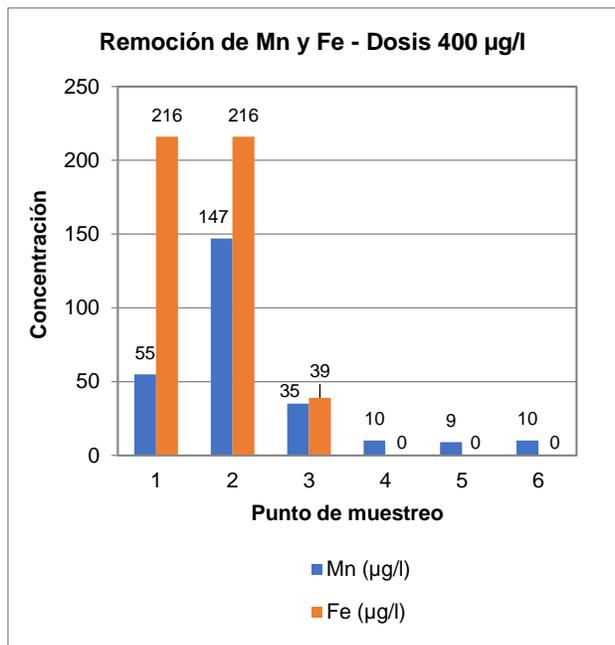


Figura 10. Remoción de Mn y Fe a una dosis de 400 µg/l de KMnO4

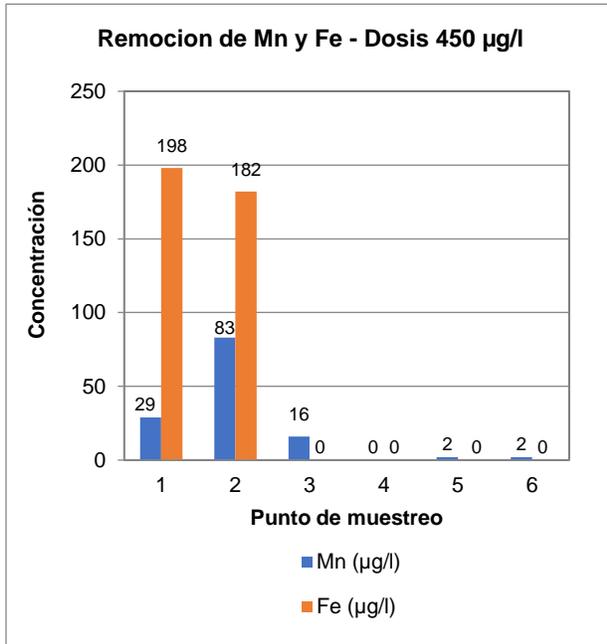


Figura 11. Remoción de Mn y Fe a una dosis de 450 µg/l de KMnO<sub>4</sub>

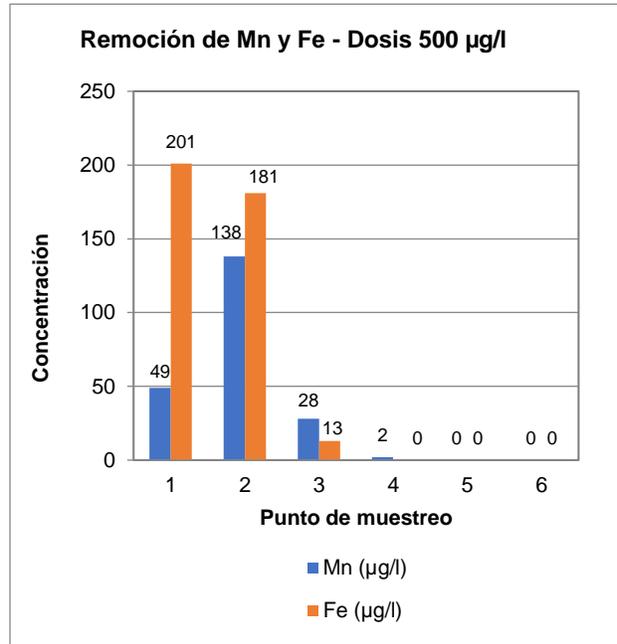


Figura 12. Remoción de Mn y Fe a una dosis de 500 µg/l de KMnO<sub>4</sub>

Las Figuras 7 hasta la 12, permiten observar la eficiencia en la remoción de Mn y Fe utilizando las diferentes dosis de permanganato aplicadas, obteniendo los mejores resultados con las dosis de 450 y 500 µg/l de KMnO<sub>4</sub> en donde las concentraciones, tanto de Mn y Fe, son reducidas mayoritariamente.

Sin embargo, éstos valores deben estar vigilados permanentemente para que sus concentraciones no superen a la normativa vigente y no deterioren el índice de calidad del agua potable. La Organización Mundial de la Salud (2006), en las “Guías para la calidad del agua potable” establece valores de referencia para estos elementos, los cuales se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Límite permitido de manganeso y hierro en el agua de consumo

Parámetro	Unidad	Límite permitido según la OMS
Hierro, Fe	mg/l	2
Manganeso, Mn	mg/l	0.4

Fuente: Organización Mundial de la Salud (2006)

### 3.3 Porcentaje de remoción

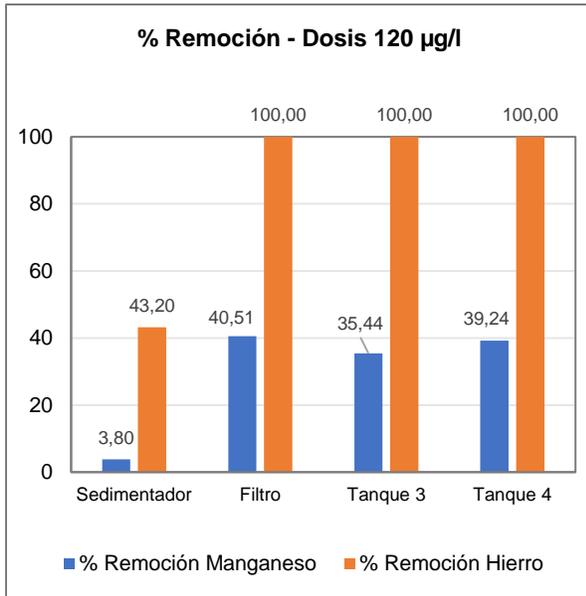


Figura 13. % Remoción – dosis 120 µg/l

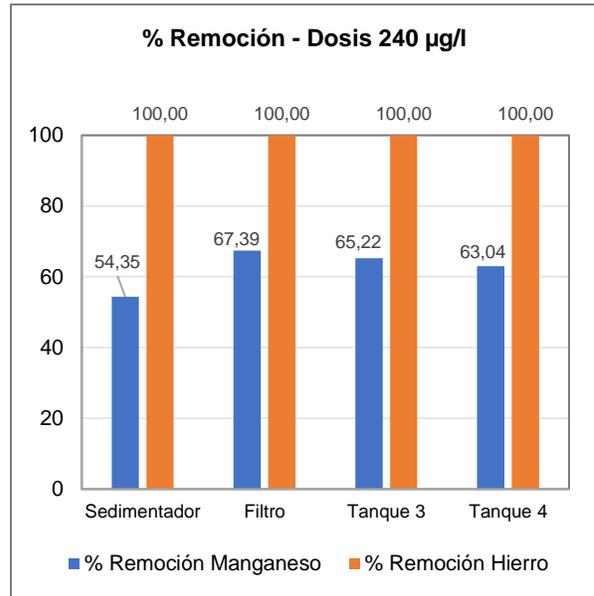


Figura 14. % Remoción – dosis 240 µg/l

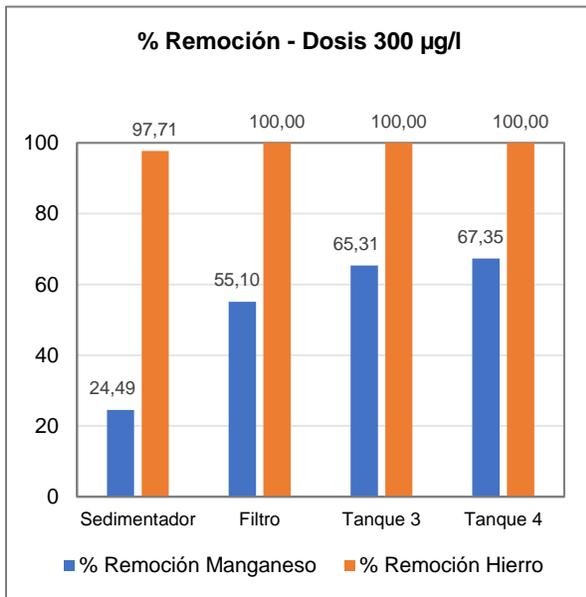


Figura 15. % Remoción – dosis 300 µg/l

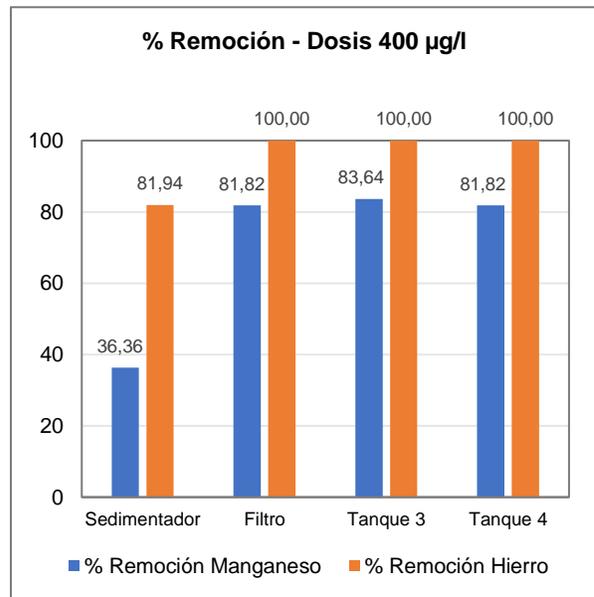


Figura 16. % Remoción – dosis 400 µg/l

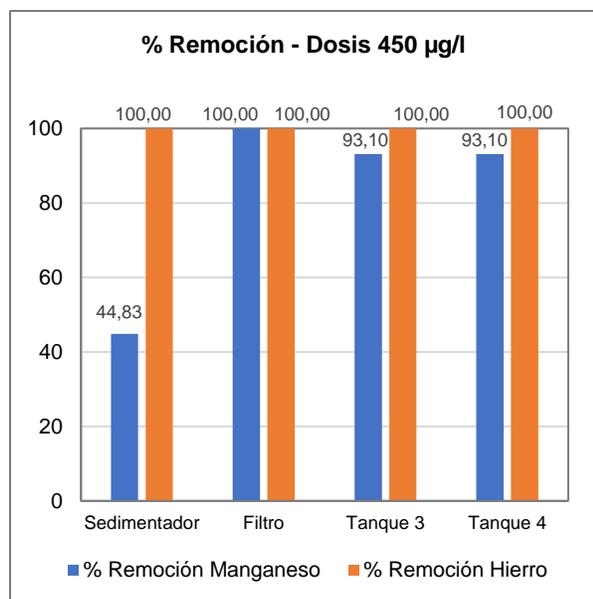


Figura 17. % Remoción – dosis 450 µg/l

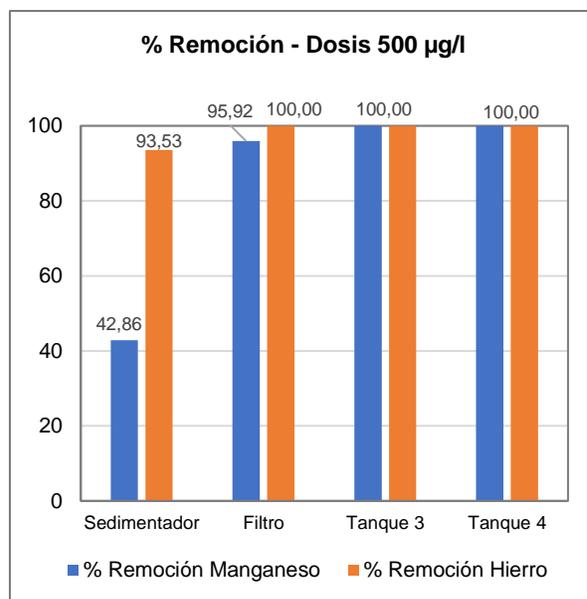


Figura 18. % Remoción – dosis 500 µg/l

Como se puede observar, las diferentes dosis aplicadas producen resultados específicos para cada caso. De tal modo, que la dosis óptima de permanganato a ser aplicada deberá ser de 500 µg/l debido a que la remoción de los metales estudiados es total. En la Tabla 6 se detalla el porcentaje de remoción de Mn y Fe obtenido en cada tratamiento. Dicho porcentaje se encuentra calculado en referencia a la concentración de los metales en los Tanques 3 y 4, y su valor obedece a la máxima remoción presentada en estos sitios de muestreo.

Tabla 6. Porcentaje de remoción y efectividad del tratamiento

Dosis de $\text{KMnO}_4$	% Remoción de Mn	% Remoción de Fe	Efectividad
120 µg/l	39.24	100	No
240 µg/l	65.22	100	No
300 µg/l	67.35	100	No
400 µg/l	83.64	100	No
450 µg/l	93.10	100	Si
500 µg/l	100	100	Si

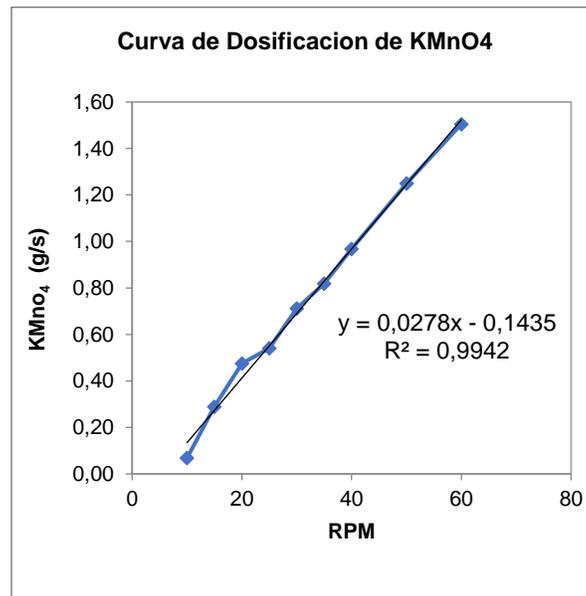
### 3.4 Modelo lineal

Los resultados se pueden observar en la Tabla 7, la cual indica los g/s de  $\text{KMnO}_4$  que son dosificados en cada RPM a la cual opera el tornillo.

Tabla 7. Método gravimétrico en el tanque dosificador

Tanque Dosificador de $\text{KMnO}_4$	
RPM	g/s
10	0,07
15	0,29
20	0,48
25	0,54
30	0,71
35	0,82
40	0,97
50	1,25
60	1,50

Mediante estos datos es posible construir una curva, que nos brindará una ecuación de carácter lineal, a través de la cual es posible determinar la dosificación de permanganato para cada caudal. La curva de dosificación se muestra en la siguiente Figura.

Figura 19. Curva de Dosificación de  $\text{KMnO}_4$  con respecto a las RPM del tornillo sinfín.

Al analizar la Figura 19, se puede evidenciar que el coeficiente de correlación es mayor a 0.99, por lo que se ajusta notablemente a una ecuación de carácter lineal, y mediante esta ecuación es posible determinar el volumen óptimo de permanganato que debe ser dosificado en el tanque de oxidación de acuerdo al caudal que trabaje en dicho momento en la Planta y al contenido de Mn con la que se encuentre el agua. La Tabla se muestra en la sección Anexos.

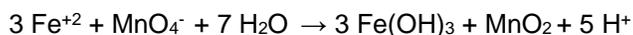
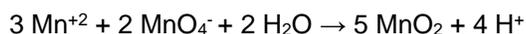
#### 4. DISCUSIÓN

La oxidación química con permanganato de potasio es el método más utilizado en el tratamiento de aguas que requieren la eliminación de manganeso y hierro. Como lo afirma Urrego Enríquez (2014), esto se debe principalmente a su fuerte poder oxidante y a su propiedad de destruir compuestos que le otorgan sabor y olor al agua e incluso, en algunos casos, puede mejorar el desempeño de los coagulantes o reducir su cantidad inyectada. El uso de cloro como agente oxidante, de acuerdo a Sánchez Zafra (2008) no está recomendada, pues el exceso de cloro puede reaccionar con la materia orgánica presente en el agua cruda originando trihalometanos (THMs), que son compuestos carcinógenos para el ser humano. No obstante, Doménech (2004) recomienda la utilización y posterior adición de cloro, como oxidante al inicio del tratamiento, en dos situaciones: la primera, cuando la materia orgánica y la turbidez de entrada del agua tienen valores bajos y, la segunda, cuando en el sistema de tratamiento existen filtros de carbón activo al final del proceso los cuales permiten la adsorción de los THMs y otros compuestos no deseables.

El análisis de varianza realizado para la concentración de manganeso, en los últimos 24 meses, muestra que existe una diferencia significativa entre todos estos datos. De acuerdo a Doria Argumedo & Deluque Vilorio (2015), esto puede deberse principalmente a determinados factores que caracterizan la cuenca del río Machángara en su zona alta, y a la influencia hídrica de la propia cuenca.

De acuerdo a la cinética de la reacción presentada por Palavecino Alvarez (2009), la eliminación de manganeso y hierro en presencia de permanganato de potasio se basa en la formación de oxi-hidróxidos complejos de manganeso y hierro que son insolubles. Para que esto suceda, tal como lo afirma Valencia Espinoza (2011) es necesario que ambos metales presenten, en un inicio, su forma química disuelta, a la cual tienen valencia divalente positiva, pues de acuerdo a Medialdea et al. (2005) una vez que ha ocurrido la oxidación, los metales son llevados a estados superiores de valencia en los que son insolubles y pueden ser eliminados fácilmente.

Por el contrario de lo que establece Medialdea et al., (2005), las partes requeridas de permanganato potásico para eliminar manganeso y hierro son superiores a las establecidas por la estequiometría de las reacciones químicas, las cuales Palavecino Alvarez (2009) las explica de la siguiente manera:



Esto se debe principalmente a que es importante tomar en cuenta el comportamiento y demanda de la materia orgánica frente al oxidante, lo que originará una mayor dosis de permanganato para oxidar el manganeso y hierro.

La remoción de manganeso y hierro no se ve influenciada de mayor manera por la aeración. Esto se pudo comprobar en pruebas de laboratorio, en donde la dosis de permanganato estudiada presentó valores

similares de remoción con el sistema de aeración y sin él. De acuerdo a Bracho et al. (2012), valores de pH alcalinos son requeridos para una mejor remoción y permitir que la aeración cumpla su misión oxidante. De este modo, el agua que ingresa al sistema de tratamiento de Tixán presenta valores de pH cercanos a la neutralidad, con lo que el tratamiento de la aeración no es efectivo como agente oxidante. Conforme la conclusión final presentada por Acosta Garrido & Arévalo Molina (2007) en su trabajo, recomiendan no subir el pH del agua cruda de ingreso debido a que ocasionaría que se altere por completo la operación establecida en la Planta.

El tiempo de residencia que presenta el tanque de oxidación permite una mejor acción oxidante del permanganato. Chuchimaque Lugo (2006), en su investigación establece que el tiempo de retención requerido para que la oxidación química resulte efectiva sea de 20 minutos. Esto se ve reflejado en la presente investigación, donde el tiempo de residencia es de 40 minutos en el tanque de oxidación, lo que permite utilizar dosis menores de permanganato y obtener altos niveles de remoción.

Por otro lado, Bastidas & Castro (2004) en su estudio han demostrado que la eliminación de manganeso y hierro solamente ocurre en las etapas de sedimentación-filtración. Esto se corrobora en esta investigación, pues la oxidación química que ocurre en el tanque de oxidación sirve únicamente como precursora de la formación de  $MnO_2$ , compuesto encargado de captar los iones de Mn y Fe para su posterior remoción.

Al contrario de los resultados presentados por Acosta Garrido & Arévalo Molina (2007), que concluyeron que la dosificación de permanganato potásico requerida para lograr la mayor remoción de Mn y Fe en la Planta de Tixán es de 3 a 6 veces el contenido del manganeso en el agua cruda, la dosis de permanganato obtenida en la presente investigación, obedece a un solo valor, independientemente de la concentración de los elementos metálicos o el caudal de ingreso, el cual es 500  $\mu g/l$ . La razón principal de utilizar una sola dosis es la presencia del tanque de oxidación, el cual contribuye en una mejor reacción para formar el precipitado de  $MnO_2$ , el cual actúa como captador de los iones metálicos de Mn y Fe tal como lo afirma Medialdea et al. (2005).

Los niveles de manganeso y hierro en los tanques de distribución de agua potable presentes en la Planta se encuentran dentro de los niveles permitidos por las "Guías para la calidad del agua potable" conforme lo establecido por la Organización Mundial de la Salud, (2006). De esta manera, las concentraciones de Mn y Fe están muy por debajo de 400  $\mu g/l$  y 2000  $\mu g/l$  respectivamente. Por lo tanto, es posible establecer que el líquido vital que llega a los usuarios que son abastecidos por la Planta de Tixán no tendrán ningún tipo de efectos negativos en su salud por ingerir el agua potable.

La eliminación de manganeso de acuerdo a lo propuesto por Loroña Calderón & Gómez Lora (2017) ofrece cierta dificultad técnica debido a su alta solubilidad en un amplio rango de pH, y a los diferentes estados de valencia (+2, +3, +4) que presenta este metal. Esto origina la formación de una amplia variedad de

óxidos de valencia mixta e inestables, siendo necesario la oxidación al estado +4 para poder removerlo eficazmente, pues a esta valencia los compuestos formados son termodinámicamente más estables.

Resulta de suma importancia controlar los parámetros de concentración, de manganeso y hierro, y removerlos en su totalidad, pues Cuchimaque Lugo, Vargas Fiallo, & Ríos Reyes (2013) explican que los precipitados de Mn y Fe que se forman y depositan en el interior de las tuberías de conducción reducen su capacidad, originando de esta manera caídas de presión en la red de abastecimiento de agua potable. En adición, Martínez Ramos & Montero Zarama (2014) sostienen que existe otra condición que se asocia con la presencia de Mn y Fe en los sistemas de abastecimiento de agua de consumo el cual es el crecimiento de microorganismos, los cuales de acuerdo a Bracho, Callejón, & Hernández (2012) se adhieren a las paredes de las tuberías formando un lodo grueso, agravando de esta manera el problema de la obstrucción. En lo que respecta a las redes domiciliarias, la Organización Mundial de la Salud (2006) indica que la presencia del Mn, así como el Fe, en concentraciones mayores de 100 µg/l produce un sabor indeseable para los consumidores y, además mancha los textiles, artículos de porcelana y aparatos sanitarios, otorgándoles un color característico café-oscuro, por lo tanto, se debe remover en su totalidad las concentraciones de estos elementos.

De acuerdo a Marín Burbano (2011) el previo conocimiento de los niveles de contaminación presente en el agua superficial causados por elementos metálicos, permiten identificar el conjunto de soluciones tecnológicas para su tratamiento eficiente. Por lo tanto, con la finalidad de garantizar la sostenibilidad de los sistemas previamente diseñados y construidos, el tratamiento de remoción elegido debe estar en función de la calidad de la fuente de agua, la facilidad de operación y mantenimiento y los costos generados.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El registro de valores históricos en lo que respecta a la concentración de manganeso presenta una gran variabilidad; esto se pudo constatar tanto en los Boxplot como en el ANOVA realizados. Es decir, no se evidencia un comportamiento similar entre los meses de los años sometidos al estudio. Esto podría indicar que la concentración de Mn depende del caudal que presenta la cuenca hidrográfica o a factores climáticos de precipitación.

Según los resultados obtenidos es posible determinar que la dosis de  $\text{KMnO}_4$  que debe ser administrada en el agua que ingresa a la Planta sea de  $500 \mu\text{g/l}$ . A esta concentración se obtienen los mayores porcentajes de remoción, principalmente de manganeso.

En el tanque de oxidación no ocurre remoción alguna de hierro y manganeso. Esta etapa, como se evidenció en la sección anterior, sirve únicamente para la formación de  $\text{MnO}_2$ . De este modo, las etapas en las que ocurre la mayor remoción de Mn y Fe son la sedimentación-filtración.

Los niveles de manganeso y hierro, determinados mediante espectrofotometría, se encuentran por debajo de los límites establecidos por la OMS. De este modo, las personas que la ingieran no tendrán problemas en su salud relacionados.

El comportamiento del manganeso no presenta relación alguna con el caudal de ingreso; se puede ampliar este estudio y determinar que parámetro influye directamente en su concentración.

Los modelos lineales permiten realizar predicciones sobre el comportamiento de una variable. En este sentido, se ha establecido una ecuación que se ajusta a este modelo matemático y mediante la cual ha sido posible relacionar las RPM a las que debe trabajar el tanque dosificador considerando tanto el caudal de entrada, así como, el contenido de Mn que presente el agua.

Para posteriores estudios las partes de permanganato requeridas para eliminar Mn y Fe deben también incluir la reacción con la materia orgánica. En la presente investigación se evidenció que las tres partes de permanganato, proveniente de las reacciones químicas, no llegan a remover eficientemente estos compuestos orgánicos.

## 6. REFERENCIAS

- Acosta Garrido, M. C., & Arévalo Molina, A. C. (2007). *Ensayos de remoción de manganeso en la Planta de Potabilización de Tixan-Cuenca*. Universidad de Cuenca.
- Bastidas, M. L., & Castro, J. A. (2004). *REMOCIÓN DE COLOR DE LIXIVIADOS TRATADOS BIOLÓGICAMENTE MEDIANTE OXIDACIÓN CON PERMANGANATO DE POTASIO*. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- Belizario Quispe, G., Capacoila Coila, J., Huaquisto Ramos, E., Cornejo Olarte, D., & Chui Betancur, H. (2019). DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE FÓSFORO Y ARSÉNICO, Y DE OTROS METALES CONTAMINANTES DE LAS AGUAS SUPERFICIALES DEL RÍO COATA, AFLUENTE DEL LAGO TITICACA, PERÚ. *Revista Boliviana de Química*, 36(5), 223–228. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.36.5.4>
- Bracho, M., Callejón, A., & Hernández, A. C. (2012). *EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE PRECIPITACIÓN DEL HIERRO Y MANGANESO DISUELTOS EN AGUA SUBTERRÁNEA UTILIZANDO AIRE O HIPOCLORITO DE SODIO COMO OXIDANTE*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4241.6000>
- Brenes González, H. A. (2017). Aplicación del análisis de regresión lineal simple para la estimación de los precios de las acciones de Facebook , Inc. *Revista Electrónica de Investigación En Ciencias Económicas*, 5(10), 133–155.
- Briñez A, K. J., Guarnizo G, J. C., & Arias V, S. A. (2012). Calidad del agua para consumo humano en el departamento del Tolima. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 30(2), 175–182.
- Bruffaerts, C., Verardi, V., & Vermandele, C. (2014). A generalized boxplot for skewed and heavy-tailed. *Statistics and Probability Letters*, 95, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.spl.2014.08.016>
- Chuchimaque Lugo, C. (2006). *REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO EN AGUAS NATURALES POR ADSORCIÓN-OXIDACIÓN SOBRE ZEOLITA NATURAL TIPO CLINOPTILOLITA*. Universidad Industrial de Santander.
- Cuchimaque Lugo, C., Vargas Fiallo, L. Y., & Ríos Reyes, C. A. (2013). Remoción de Fe y Mn en aguas naturales por adsorción-oxidación sobre clinoptilolita. *Rev. Fac. Ing. Uni. Antioquía*, 66, 24–44.
- Díaz Granda, C. M. (2018). *UNA MIRADA A LOS VEINTE AÑOS DE GESTIÓN DEL COMITÉ DE CONSERVACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA*. Cuenca, Ecuador.
- Doménech, J. (2004). Ozono frente a cloro. *OFFARM*, 23(5), 120–126.

- Doria Argumedo, C., & Deluque Viloria, H. (2015). Niveles y distribución de metales pesados en el agua de la zona de playa de Riohacha, La Guajira, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 123–131.
- ETAPA EP. (2015). *DISEÑOS DEFINITIVOS PARA LA AMPLIACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE TIXAN - MODULO II*. Cuenca.
- ETAPA EP. (2016). *AMPLIACION DE LA CAPACIDAD DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE TIXAN: MODULO II*. Cuenca, Ecuador.
- Fernández Cirelli, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 11(3), 147–170.
- Flores Ruiz, E., Miranda Novales, M. G., & Villasís Keever, M. Á. (2017). El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial. Revista Alergia México*, 64(3), 364–370.
- Gallo Aponte, W. I. (2019). LA CALIDAD REGULATORIA EN EL SERVICIO PÚBLICO DE ACUEDUCTO Y AGUA POTABLE. UN ANÁLISIS A PARTIR DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS). *Revista de Direito Brasileira, SC*, 22(9), 372–395.
- Hubert, M., & Vandervieren, E. (2008). An adjusted boxplot for skewed distributions. *Computational Statistics & Data Analysis*, 52(12), 5186–5201. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2007.11.008>
- Loroña Calderón, F., & Gómez Lora, W. (2017). Propuesta de tratamiento para la eliminación del manganeso en la Planta de Neutralización de Aguas Ácidas, Victoria-Compañía Minera Volcan S.A.A, Perú. *Cátedra Villarreal*, 5(1), 11–30. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24039/cv201751183>
- Marín Burbano, L. M. (2011). *REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO POR OXIDACIÓN CON CLORO Y FILTRACIÓN EN GRAVA*. Universidad Del Valle.
- Martínez Ramos, M. M., & Montero Zarama, E. F. (2014). *EVALUACIÓN DE REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO EN AIREADORES DE TOBERAS EN LA CIUDAD SAN JUAN DE PASTO*. Universidad de Nariño.
- Medialdea, J. M., Arnáiz, C., & Díaz, E. (2005). *Permanganato potásico: un potente y versátil oxidante*. Sevilla.
- Oblitas De Ruiz, L. (2010). *Servicios de agua potable y saneamiento en el Perú: beneficios potenciales y determinantes de éxito*. CEPAL. Documento de proyecto. Santiago de Chile.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*.

- Palavecino Alvarez, P. (2009). *DISEÑO DE AMPLIACION Y OPTIMIZACION DE PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA PARA LA EMPRESA DSD CONSTRUCCIONES Y MONTAJES S.A.* Pontificia Universidad Católica de Valparaiso.
- Reding Bernal, A., Zamora Macorra, M., & López Alvarenga, J. C. (2011). ¿Cómo y cuándo realizar un análisis de regresión lineal simple? Aplicación e interpretación. *Dermatología Revista Mexicana*, 55(6), 395–402.
- Rendón Macías, Mario Enrique Villasís Keever, M. Á., & Miranda Novales, M. G. (2016). Estadística descriptiva. *Revista Alergia México*, 63(4), 397–407.
- Rubio Hurtado, M. J., & Berlanga Silvente, V. (2012). Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas t de Student y ANOVA en SPSS . Caso práctico . *REIRE*, 5(2), 83–100. <https://doi.org/10.1344/reire2012.5.2527>
- Sánchez Merchán, E. A. (2018). *Optimización de la gestión de estaciones depuradoras de agua residual en el área rural de Cuenca, Ecuador.* Universidad Politécnica de Madrid.
- Sánchez Zafra, A. (2008). Efectos de los trihalometanos sobre la salud. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 8, 280–290.
- Sanz, J., Lombraña, J. I., & De Luis, A. (2013). Estado del arte en la oxidación avanzada a efluentes industriales: nuevos desarrollos y futuras tendencias. *AFINIDAD LXX*, 561, 25–33.
- Seisdedo Losa, M., Diaz Asencio, M., Castellanos Torres, L., & Arencibia Carballo, G. (2015). Comportamiento de hierro y manganeso en la calidad de las aguas del embalse de Paso Bonito (Cienfuegos, Cuba). *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras*, 32(1), 65–71.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2020). *AGUA PARA CONSUMO HUMANO. REQUISITOS.* Quito - Ecuador.
- Urrego Enríquez, S. P. (2014). *EVALUACIÓN DE UNA PRUEBA TECNOLÓGICA DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE FENOLES MEDIANTE DIOXIDO DE CLORO PARA EL TRATAMIENTO EN EL AGUA DE PRODUCCIÓN DE LA ESTACIÓN ACACIAS 1 DE ECOPEPETROL S.A.* Universidad Industrial de Santander.
- Valencia Espinoza, C. E. (2011). *QUÍMICA DEL HIERRO Y MANGANESO EN EL AGUA, MÉTODOS DE REMOCIÓN.* Universidad de Cuenca.

## 7. ANEXOS

Tabla 8. Dosificación de KMnO4 considerando el caudal de ingreso y la concentración de Mn

RPM	CAUDAL (l/s)																	
	150 µg/l	200 µg/l	250 µg/l	300 µg/l	350 µg/l	400 µg/l	450 µg/l	500 µg/l	550 µg/l	600 µg/l	650 µg/l	700 µg/l	750 µg/l	800 µg/l	850 µg/l	900 µg/l	950 µg/l	1000 µg/l
7	341	256	204	170	146	128	114	102	93	85	79	73	68	64	60	57	54	51
8	526	395	316	263	225	197	175	158	143	132	121	113	105	99	93	88	83	79
9	711	534	427	356	305	267	237	213	194	178	164	152	142	133	126	119	112	107
10	897	673	538	448	384	336	299	269	245	224	207	192	179	168	158	149	142	135
11	1082	812	649	541	464	406	361	325	295	271	250	232	216	203	191	180	171	162
12	1267	951	760	634	543	475	422	380	346	317	292	272	253	238	224	211	200	190
13	1453	1090	872	726	623	545	484	436	396	363	335	311	291	272	256	242	229	218
14	1638	1229	983	819	702	614	546	491	447	410	378	351	328	307	289	273	259	246
15	1823	1368	1094	912	781	684	608	547	497	456	421	391	365	342	322	304	288	274
16	2009	1507	1205	1004	861	753	670	603	548	502	464	430	402	377	354	335	317	301
17	2194	1646	1316	1097	940	823	731	658	598	549	506	470	439	411	387	366	346	329
18	2379	1785	1428	1190	1020	892	793	714	649	595	549	510	476	446	420	397	376	357
19	2565	1924	1539	1282	1099	962	855	769	699	641	592	550	513	481	453	427	405	385
20	2750	2063	1650	1375	1179	1031	917	825	750	688	635	589	550	516	485	458	434	413
21	2935	2202	1761	1468	1258	1101	978	881	801	734	677	629	587	550	518	489	463	440
22	3121	2341	1872	1560	1337	1170	1040	936	851	780	720	669	624	585	551	520	493	468
23	3306	2480	1984	1653	1417	1240	1102	992	902	827	763	708	661	620	583	551	522	496
24	3491	2619	2095	1746	1496	1309	1164	1047	952	873	806	748	698	655	616	582	551	524
25	3677	2758	2206	1838	1576	1379	1226	1103	1003	919	848	788	735	689	649	613	581	552
26	3862	2897	2317	1931	1655	1448	1287	1159	1053	966	891	828	772	724	682	644	610	579
27	4047	3036	2428	2024	1735	1518	1349	1214	1104	1012	934	867	809	759	714	675	639	607
28	4233	3175	2540	2116	1814	1587	1411	1270	1154	1058	977	907	847	794	747	705	668	635
29	4418	3314	2651	2209	1893	1657	1473	1325	1205	1105	1020	947	884	828	780	736	698	663
30	4603	3453	2762	2302	1973	1726	1534	1381	1255	1151	1062	986	921	863	812	767	727	691
31	4789	3592	2873	2394	2052	1796	1596	1437	1306	1197	1105	1026	958	898	845	798	756	718
32	4974	3731	2984	2487	2132	1865	1658	1492	1357	1244	1148	1066	995	933	878	829	785	746
33	5159	3870	3096	2580	2211	1935	1720	1548	1407	1290	1191	1106	1032	967	910	860	815	774

<b>34</b>	5345	4009	3207	2672	2291	2004	1782	1603	1458	1336	1233	1145	1069	1002	943	891	844	802
<b>35</b>	5530	4148	3318	2765	2370	2074	1843	1659	1508	1383	1276	1185	1106	1037	976	922	873	830
<b>36</b>	5715	4287	3429	2858	2449	2143	1905	1715	1559	1429	1319	1225	1143	1072	1009	953	902	857
<b>37</b>	5901	4426	3540	2950	2529	2213	1967	1770	1609	1475	1362	1264	1180	1106	1041	983	932	885
<b>38</b>	6086	4565	3652	3043	2608	2282	2029	1826	1660	1522	1404	1304	1217	1141	1074	1014	961	913
<b>39</b>	6271	4704	3763	3136	2688	2352	2090	1881	1710	1568	1447	1344	1254	1176	1107	1045	990	941
<b>40</b>	6457	4843	3874	3228	2767	2421	2152	1937	1761	1614	1490	1384	1291	1211	1139	1076	1019	969
<b>41</b>	6642	4982	3985	3321	2847	2491	2214	1993	1811	1661	1533	1423	1328	1245	1172	1107	1049	996
<b>42</b>	6827	5121	4096	3414	2926	2560	2276	2048	1862	1707	1576	1463	1365	1280	1205	1138	1078	1024
<b>43</b>	7013	5260	4208	3506	3005	2630	2338	2104	1913	1753	1618	1503	1403	1315	1238	1169	1107	1052
<b>44</b>	7198	5399	4319	3599	3085	2699	2399	2159	1963	1800	1661	1542	1440	1350	1270	1200	1137	1080
<b>45</b>	7383	5538	4430	3692	3164	2769	2461	2215	2014	1846	1704	1582	1477	1384	1303	1231	1166	1108
<b>46</b>	7569	5677	4541	3784	3244	2838	2523	2271	2064	1892	1747	1622	1514	1419	1336	1261	1195	1135
<b>47</b>	7754	5816	4652	3877	3323	2908	2585	2326	2115	1939	1789	1662	1551	1454	1368	1292	1224	1163
<b>48</b>	7939	5955	4764	3970	3403	2977	2646	2382	2165	1985	1832	1701	1588	1489	1401	1323	1254	1191
<b>49</b>	8125	6094	4875	4062	3482	3047	2708	2437	2216	2031	1875	1741	1625	1523	1434	1354	1283	1219
<b>50</b>	8310	6233	4986	4155	3561	3116	2770	2493	2266	2078	1918	1781	1662	1558	1466	1385	1312	1247
<b>51</b>	8495	6372	5097	4248	3641	3186	2832	2549	2317	2124	1960	1820	1699	1593	1499	1416	1341	1274
<b>52</b>	8681	6511	5208	4340	3720	3255	2894	2604	2367	2170	2003	1860	1736	1628	1532	1447	1371	1302
<b>53</b>	8866	6650	5320	4433	3800	3325	2955	2660	2418	2217	2046	1900	1773	1662	1565	1478	1400	1330
<b>54</b>	9051	6789	5431	4526	3879	3394	3017	2715	2469	2263	2089	1940	1810	1697	1597	1509	1429	1358
<b>55</b>	9237	6928	5542	4618	3959	3464	3079	2771	2519	2309	2132	1979	1847	1732	1630	1539	1458	1386
<b>56</b>	9422	7067	5653	4711	4038	3533	3141	2827	2570	2356	2174	2019	1884	1767	1663	1570	1488	1413
<b>57</b>	9607	7206	5764	4804	4117	3603	3202	2882	2620	2402	2217	2059	1921	1801	1695	1601	1517	1441
<b>58</b>	9793	7345	5876	4896	4197	3672	3264	2938	2671	2448	2260	2098	1959	1836	1728	1632	1546	1469
<b>59</b>	9978	7484	5987	4989	4276	3742	3326	2993	2721	2495	2303	2138	1996	1871	1761	1663	1575	1497
<b>60</b>	10163	7623	6098	5082	4356	3811	3388	3049	2772	2541	2345	2178	2033	1906	1794	1694	1605	1525

---

Tabla 8. Dosificación de KMnO4 considerando el caudal de ingreso y la concentración de Mn (continuación)

<b>RPM</b>	<b>1050</b>	<b>1100</b>	<b>1150</b>	<b>1200</b>	<b>1250</b>	<b>1300</b>	<b>1350</b>	<b>1400</b>	<b>1450</b>	<b>1500</b>	<b>1550</b>	<b>1600</b>	<b>1650</b>	<b>1700</b>	<b>1750</b>	<b>1800</b>	<b>1850</b>	<b>1900</b>	<b>1950</b>	<b>2000</b>
	<b>µg/l</b>																			
<b>7</b>	49	46	44	43	41	39	38	37	35	34	33	32	31	30	29	28	28	27	26	26
<b>8</b>	75	72	69	66	63	61	58	56	54	53	51	49	48	46	45	44	43	42	40	39
<b>9</b>	102	97	93	89	85	82	79	76	74	71	69	67	65	63	61	59	58	56	55	53
<b>10</b>	128	122	117	112	108	103	100	96	93	90	87	84	82	79	77	75	73	71	69	67
<b>11</b>	155	148	141	135	130	125	120	116	112	108	105	101	98	95	93	90	88	85	83	81
<b>12</b>	181	173	165	158	152	146	141	136	131	127	123	119	115	112	109	106	103	100	97	95
<b>13</b>	208	198	189	182	174	168	161	156	150	145	141	136	132	128	125	121	118	115	112	109
<b>14</b>	234	223	214	205	197	189	182	176	169	164	159	154	149	145	140	137	133	129	126	123
<b>15</b>	260	249	238	228	219	210	203	195	189	182	176	171	166	161	156	152	148	144	140	137
<b>16</b>	287	274	262	251	241	232	223	215	208	201	194	188	183	177	172	167	163	159	155	151
<b>17</b>	313	299	286	274	263	253	244	235	227	219	212	206	199	194	188	183	178	173	169	165
<b>18</b>	340	324	310	297	286	275	264	255	246	238	230	223	216	210	204	198	193	188	183	178
<b>19</b>	366	350	335	321	308	296	285	275	265	256	248	240	233	226	220	214	208	202	197	192
<b>20</b>	393	375	359	344	330	317	306	295	284	275	266	258	250	243	236	229	223	217	212	206
<b>21</b>	419	400	383	367	352	339	326	315	304	294	284	275	267	259	252	245	238	232	226	220
<b>22</b>	446	426	407	390	374	360	347	334	323	312	302	293	284	275	267	260	253	246	240	234
<b>23</b>	472	451	431	413	397	381	367	354	342	331	320	310	301	292	283	276	268	261	254	248
<b>24</b>	499	476	455	436	419	403	388	374	361	349	338	327	317	308	299	291	283	276	269	262
<b>25</b>	525	501	480	460	441	424	409	394	380	368	356	345	334	324	315	306	298	290	283	276
<b>26</b>	552	527	504	483	463	446	429	414	400	386	374	362	351	341	331	322	313	305	297	290
<b>27</b>	578	552	528	506	486	467	450	434	419	405	392	379	368	357	347	337	328	320	311	304
<b>28</b>	605	577	552	529	508	488	470	454	438	423	410	397	385	373	363	353	343	334	326	317
<b>29</b>	631	602	576	552	530	510	491	473	457	442	428	414	402	390	379	368	358	349	340	331
<b>30</b>	658	628	600	575	552	531	511	493	476	460	445	432	418	406	395	384	373	363	354	345
<b>31</b>	684	653	625	599	575	553	532	513	495	479	463	449	435	423	410	399	388	378	368	359
<b>32</b>	711	678	649	622	597	574	553	533	515	497	481	466	452	439	426	415	403	393	383	373
<b>33</b>	737	704	673	645	619	595	573	553	534	516	499	484	469	455	442	430	418	407	397	387
<b>34</b>	764	729	697	668	641	617	594	573	553	534	517	501	486	472	458	445	433	422	411	401
<b>35</b>	790	754	721	691	664	638	614	593	572	553	535	518	503	488	474	461	448	437	425	415

<b>36</b>	816	779	745	714	686	659	635	612	591	572	553	536	520	504	490	476	463	451	440	429
<b>37</b>	843	805	770	738	708	681	656	632	610	590	571	553	536	521	506	492	478	466	454	443
<b>38</b>	869	830	794	761	730	702	676	652	630	609	589	571	553	537	522	507	493	480	468	456
<b>39</b>	896	855	818	784	753	724	697	672	649	627	607	588	570	553	538	523	508	495	482	470
<b>40</b>	922	880	842	807	775	745	717	692	668	646	625	605	587	570	553	538	524	510	497	484
<b>41</b>	949	906	866	830	797	766	738	712	687	664	643	623	604	586	569	554	539	524	511	498
<b>42</b>	975	931	891	853	819	788	759	732	706	683	661	640	621	602	585	569	554	539	525	512
<b>43</b>	1002	956	915	877	842	809	779	751	725	701	679	657	638	619	601	584	569	554	539	526
<b>44</b>	1028	982	939	900	864	831	800	771	745	720	697	675	654	635	617	600	584	568	554	540
<b>45</b>	1055	1007	963	923	886	852	820	791	764	738	715	692	671	651	633	615	599	583	568	554
<b>46</b>	1081	1032	987	946	908	873	841	811	783	757	732	710	688	668	649	631	614	598	582	568
<b>47</b>	1108	1057	1011	969	930	895	862	831	802	775	750	727	705	684	665	646	629	612	596	582
<b>48</b>	1134	1083	1036	992	953	916	882	851	821	794	768	744	722	701	681	662	644	627	611	595
<b>49</b>	1161	1108	1060	1016	975	937	903	871	840	812	786	762	739	717	696	677	659	641	625	609
<b>50</b>	1187	1133	1084	1039	997	959	923	890	860	831	804	779	755	733	712	693	674	656	639	623
<b>51</b>	1214	1158	1108	1062	1019	980	944	910	879	850	822	796	772	750	728	708	689	671	653	637
<b>52</b>	1240	1184	1132	1085	1042	1002	965	930	898	868	840	814	789	766	744	723	704	685	668	651
<b>53</b>	1267	1209	1156	1108	1064	1023	985	950	917	887	858	831	806	782	760	739	719	700	682	665
<b>54</b>	1293	1234	1181	1131	1086	1044	1006	970	936	905	876	849	823	799	776	754	734	715	696	679
<b>55</b>	1320	1260	1205	1155	1108	1066	1026	990	956	924	894	866	840	815	792	770	749	729	711	693
<b>56</b>	1346	1285	1229	1178	1131	1087	1047	1010	975	942	912	883	857	831	808	785	764	744	725	707
<b>57</b>	1372	1310	1253	1201	1153	1109	1067	1029	994	961	930	901	873	848	823	801	779	758	739	721
<b>58</b>	1399	1335	1277	1224	1175	1130	1088	1049	1013	979	948	918	890	864	839	816	794	773	753	734
<b>59</b>	1425	1361	1301	1247	1197	1151	1109	1069	1032	998	966	935	907	880	855	832	809	788	768	748
<b>60</b>	1452	1386	1326	1270	1220	1173	1129	1089	1051	1016	984	953	924	897	871	847	824	802	782	762