

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

Propuesta para la optimización de la eficiencia de remoción de Manganeseo y Hierro por dosificación de permanganato de potasio en la Planta de Tratamiento de Agua Cruda Tixán - ETAPA-EP mediante la incorporación de un sistema de aireadores

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico

Autores:

María Paz Campoverde Ortega

Carla Dayanara Molina Armijos

Director:

Verónica Patricia Pinos Vélez

ORCID:  0000-0001-8278-5873

Cuenca, Ecuador

2024 - 11 - 19

Resumen

La planta de tratamiento de agua Tixán cuenta con un sistema de dosificación de permanganato de potasio para reducir los niveles de manganeso (II) y hierro (II) en agua a niveles seguros para el consumo humano. Sin embargo, se presentan interferencias operativas en el proceso inicial de oxidación de metales, debido a que el hierro es el elemento que consume mayor parte del permanganato de potasio y el manganeso no se oxida. Por este motivo, ETAPA EP instaló un sistema de aireadores para incorporar oxígeno y oxidar el hierro, dejando al permanganato de potasio disponible para oxidar al manganeso. El sistema consta de 5 pares de aireadores ubicados paralelamente. En este trabajo se propuso un diseño experimental para determinar el efecto que generan diferentes configuraciones de los aireadores en la oxidación del manganeso y hierro, junto con el tratamiento de oxidación con permanganato de potasio. El seguimiento de la oxidación del hierro y el manganeso se verificó por absorción atómica. Para determinar la eficiencia de los tratamientos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5%. Los resultados indicaron que existieron diferencias estadísticamente significativas para el hierro, entre la etapa captación de agua cruda y la distribución a los módulos, (p value = $2e-16$ y $1.56e-4$ respectivamente), debido a que las concentraciones iniciales no son constantes y existe una variación dado a que proviene de un recurso natural y está propenso a factores como lixiviaciones, lluvias, etc., alterando así los valores de concentración de hierro y manganeso. No se encontraron diferencias entre las etapas posteriores, pues a partir de la sedimentación ya ocurrió una remoción total del hierro. Por el contrario, en el análisis de las concentraciones de manganeso, se identificaron diferencias significativas en todas las etapas. Finalmente, se supone que el tratamiento óptimo para el proceso de remoción de hierro y manganeso y que, a su vez, posee el menor gasto energético es el primer tratamiento sin sistema de aireación.

Palabras clave del autor: oxidación de metales, agua potable, calidad de agua, sedimentación, aireación



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The Tixan water treatment plant has a potassium permanganate dosing system to reduce manganese (II) and iron (II) levels in water to safe levels for human consumption. However, there are operational interferences in the initial metal oxidation process because iron is the element that consumes most of the potassium permanganate and manganese is not oxidized. For this reason, ETAPA EP installed an aerator system to incorporate oxygen and oxidize the iron, leaving the potassium permanganate available to oxidize the manganese. The system consists of 5 pairs of aerators placed in parallel. In this work, an experimental design was proposed to determine the effect of different aerator configurations on the oxidation of manganese and iron, together with the oxidation treatment with potassium permanganate. The monitoring of iron and manganese oxidation was verified by atomic absorption. To determine the efficiency of the treatments, an analysis of variance (ANOVA) was performed at a significance level of 5%. The results indicated that there were statistically significant differences for iron between the raw water collection stage and the distribution to the modules (p value = $2e-16$ and $1.56e-4$, respectively), due to the fact that the initial concentrations are not constant and there is a variation since it comes from a natural resource and is prone to factors such as leaching, rainfall, etc., thus altering the iron and manganese concentration values. No differences were found between the subsequent stages, since from sedimentation onwards, total iron removal had already occurred. On the other hand, in the analysis of manganese concentrations, significant differences were identified in all stages. Finally, it is assumed that the optimal treatment for the iron and manganese removal process and that, in turn, it has the lowest energy expenditure is the first treatment without aeration system.

Author keywords: metal oxidation, drinking water, water quality, sedimentation, aeration



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Lista de abreviaturas

ARCA: Agencia de Regulación y Control del Agua

INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización

ISO: Organización Internacional de Estandarización

TULSMA: Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente

LD: Límites de detección

Índice de contenido

INTRODUCCIÓN	11
Antecedentes	11
Problema y justificación	11
Objetivos	13
1. MARCO TEÓRICO	14
1.1 Agua Segura	14
1.2 Potabilización del agua	15
1.2.1 Captación	15
1.2.1.1 Conducción por gravedad	15
1.2.1.2 Conducción por bombeo	15
1.2.1.3 Conducción por aducción	16
1.2.2 Coagulación y Floculación	16
1.2.3 Sedimentación	16
1.2.4 Filtración	17
1.2.5 Desinfección	17
1.2.6 Control de calidad	17
1.3 Manganeseo y hierro en el agua	18
1.3.1 Manganeseo	18
1.3.2 Hierro	19
1.3.3 Normativa Nacional: concentraciones de hierro y manganeseo	21
1.3.4 Oxidación para la remoción de metales	22
1.3.5 Oxidación con permanganato de potasio	22
1.3.6 Aireación con uso de aireadores	23
1.4 Estudios de optimización mediante diseño experimental	24
1.4.1 Selección del tipo de muestreo	24
1.4.2 Selección del análisis estadístico	25
2. METODOLOGÍA	28
2.1 Área de Estudio	28
2.2 Proceso de oxidación de hierro y manganeseo en la planta Tixán	29
2.3 Diseño experimental	31

2.4 Definición de los puntos de muestreo	32
2.5 Recolección de muestras	33
2.6 Análisis de muestras	34
2.7 Medición de la dosis suministrada de permanganato de potasio	35
2.8 Análisis de varianza de los datos de concentración de los metales	35
2.9 Consumo energético de los aireadores	36
2.10 Sesgos	36
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
3.1 Dosis de permanganato de potasio suministrado	37
3.2 Hierro	38
3.2.1 Análisis estadístico general por punto de muestreo	38
3.2.2 Diseño Experimental: Concentraciones y remociones de hierro por cada tratamiento empleado	40
3.2.3 Análisis estadístico de valores de concentración y remoción de hierro	42
3.3 Manganeso	43
3.3.1 Análisis general por punto de muestreo	43
3.3.2 Diseño Experimental: Concentraciones y remociones de hierro por cada tratamiento empleado	44
3.3.3 Análisis estadístico de valores de concentración y concentración de manganeso	46
3.4 Selección de la configuración de aireadores óptima	47
3.5 Consumo energético de los tratamientos	48
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
4.1 Conclusiones	49
4.2 Recomendaciones	50
Referencias	51
Anexos	57

Índice de tablas

Tabla 1. Pares de aireadores empleados en cada tratamiento	31
Tabla 2. Datos de la toma de muestras de KMnO_4 .	38
Tabla 3. Resumen del análisis de concentraciones de hierro en $\mu\text{g/L}$ para todas las etapas de muestreo.	40
Tabla 4. Resultados de la concentración promedio de hierro ($\mu\text{g/L}$) y porcentaje de remoción (%).	41
Tabla 5. ANOVA para determinar diferencias de remoción de hierro por tratamiento en cada punto de muestreo.	42
Tabla 6. Resumen del análisis de concentraciones de manganeso en $\mu\text{g/L}$ para todas las etapas de muestreo.	44
Tabla 7. Resultados de la concentración promedio de manganeso ($\mu\text{g/L}$) y porcentaje de remoción (%).	45
Tabla 8. ANOVA para determinar diferencias de remoción de manganeso por tratamiento en cada punto de muestreo.	47

Índice de figuras

Figura 1. Fórmulas de la tabla ANOVA de un factor.	26
Figura 2. Ubicación de la Central Hidroeléctrica Saymirín y la Planta de tratamiento de agua Tixán.	28
Figura 3. Dosificación de la solución de permanganato de potasio para el agua cruda.	29
Figura 4. Vista frontal de los aireadores encendidos.	30
Figura 5. Vista lateral de los aireadores encendidos.	30
Figura 6. Esquema de disposición de aireadores en la recepción de agua del río Machángara de la planta de TIXÁN.	32
Figura 7. Diseño del sistema de tratamiento de agua en la planta Tixán y ubicación de los puntos de muestreo.	33
Figura 8. Diagrama de cajas de las concentraciones de hierro en cada punto de muestreo.	39
Figura 9. Diagrama de cajas de las concentraciones de manganeso en cada punto de muestreo.	43

Agradecimientos

Expresamos nuestro profundo agradecimiento a nuestra tutora, Dra. Verónica Pinos, por su inquebrantable atención, confianza, orientación y dedicación incondicional a lo largo de este trabajo. Su esmero y apoyo han sido fundamentales para desarrollar este trabajo de titulación.

A la Universidad de Cuenca, por brindarnos la oportunidad de formarnos académicamente y por prepararnos profesionalmente, permitiéndonos adquirir las competencias y conocimientos necesarios para nuestro desarrollo integral.

A nuestros profesores, por impartir una formación académica de calidad y por su compromiso en la formación de profesionales de excelencia. Su esfuerzo y motivación han sido clave en nuestro crecimiento académico.

Al Ingeniero Juan Diego Espinoza, por brindarnos la oportunidad de desarrollar este proyecto y por su valiosa colaboración y asistencia técnica, que hicieron posible la realización de este trabajo.

Al personal de ETAPA EP, por su amabilidad y disposición, facilitando el acceso a los recursos y apoyo necesarios para la ejecución de este estudio.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Gabriela y Paúl, quienes han sido mi apoyo incondicional y mi mejor compañía a lo largo de esta experiencia. Gracias a su esfuerzo, confianza y amor, he podido cumplir mis metas. Todo lo que he logrado y lo que alcanzaré en el futuro se los debo a ustedes, por lo que la gratificación de este arduo trayecto es para ustedes.

A mis hermanos, por brindarme el calor de una familia unida y por hacer de cada día un hogar lleno de cariño.

A mi abuela Cecilia, por su constante ayuda y fe en mí, siempre creyendo en mi potencial. De igual manera, a mis abuelos, Hernán y Anita, por su afecto que me ha inspirado a mantener la constancia en la búsqueda de mis sueños.

A mi mejor amiga Dana, por su confianza y ánimo a lo largo de todos estos años, que me han motivado a seguir adelante.

Y a mi amiga y compañera de carrera, Dayanara, por llenar mi experiencia universitaria de risas y momentos inolvidables. Gracias por tu apoyo incondicional desde nuestro primer día de universidad y por ser parte esencial de mi crecimiento académico y personal.

- Paz

Dedico este trabajo a una de las personas más importantes en mi vida, mi mamá, Dalila, pues esto le pertenece más a ella que a mí. Es mi más grande ejemplo a seguir, sinónimo de perseverancia, incondicionalidad y lucha. Le agradezco por haberme edificado como una mujer de bien. Su sacrificio, complicidad, apoyo incondicional y lo más importante, los valores que ha forjado en mí mientras me guiaba a lo largo de estos increíbles 24 años, han sido fundamentales para perseguir y alcanzar mis sueños. Deseo con todo mi corazón que todo su esfuerzo y amor hacia mí se refleje en este y todos los logros que pueda alcanzar en el futuro.

A mi hermano Mathi, el amor más puro que llegó a cambiar mi vida. Eres mi energía a vivir y no importa en donde yo me encuentre, siempre te cuidaré y guiaré.

A mi papá Juan Carlos, aunque la distancia nos separa, él ha encontrado la manera de estar presente apoyándome y aconsejándome.

A mis ángeles terrenales, mis abuelitos, Gladys & Alejandro, fuente inagotable de amor, sabiduría y paciencia, han sido mi pilar más fuerte. Gracias por darme las alas para soñar alto, por ser ese faro que me guía hacia la luz en los días oscuros. Espero que la vida me alcance para recompensar todo su sacrificio. A mis ñaños, Juan & Alejandro, quienes me han ayudado y apoyado.

A mi incondicional en estos maravillosos años, mi Tom. Tu influencia ilumina mi camino, gracias por ser mi soporte en mis momentos difíciles y por hacerme sentir amada siempre. Mencionando las palabras del gran Tyler Joseph: "I just pray that I'm not losing you".

A mi Angy, quien con su positivismo y genuinidad me ha alentado a salir de mi zona de confort, me ha enseñado a no rendirme, a conocer una versión mejorada de mí y avanzar hacia quien anhelo ser.

Mi mejor compañera de tesis y amiga, Paz. Gracias por compartir tu sabiduría, tiempo y amistad incondicional conmigo.

- Dayanara

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La ciudad de Cuenca se caracteriza por su calidad de agua potable, al ser una de las pocas que están aptas para el consumo directo del sistema de suministro público en el Ecuador (El Mercurio, 2023). Este mérito es atribuido a la Empresa de Telecomunicaciones, Agua potable y Alcantarillado (ETAPA EP) donde una de las tres plantas de tratamiento de agua más importantes es la de Tixán que además cuenta con la certificación ISO 9001-2015 y opera desde el año 1996 (Espinoza, 2023). La principal fuente de captación de agua cruda para la planta de Tixán es el río Machángara la cual fluye al norte de la ciudad.

El sistema de potabilización de la planta cuenta con dos módulos; de los cuales el segundo fue puesto en marcha en el año 2019, debido a un aumento de la demanda de agua potable de la población (Abad & Guaraca, 2022). Los módulos funcionan simultáneamente y bajo las mismas condiciones de trabajo, con un caudal total aproximado de 1100 L/s.

La planta cuenta con una metodología convencional para el tratamiento de agua potable, la misma que consiste en una serie de procesos que incluye a la coagulación, mediante el uso de agentes químicos como el sulfato de aluminio, seguida de una floculación, sedimentación, filtración y finalmente, la desinfección mediante cloración, en donde posteriormente el agua se dirige a los tanques de almacenamiento para el suministro a los hogares o a sus respectivos destinos.

Problema y justificación

Uno de los principales desafíos por los que atraviesa la planta de tratamiento de agua Tixán es la ocurrencia de metales como manganeso y hierro en el agua de entrada. Estos metales, cuando están presentes en cantidades elevadas, afectan al color, olor y sabor del agua destinada al consumo humano. Además, si no se someten a un tratamiento adecuado, pueden dar lugar a complicaciones graves en las tuberías, como obstrucciones, formación de incrustaciones que progresivamente pueden ocasionar corrosión (Petrusevski, 2003). Estos problemas no solo afectan la eficiencia operativa de la planta, sino que también generan un aumento en los costos de mantenimiento. Por tanto, la gestión efectiva de la concentración de manganeso y hierro es un asunto de gran importancia para garantizar la calidad del agua potabilizada, así como para mantener la sostenibilidad económica de la planta.

Debido a esto la planta ha implementado un sistema de oxidación empleando permanganato de potasio y complementaron el proceso mediante la incorporación de un sistema de aireación en el año 2019. La planta cuenta con dos unidades de pretratamiento en paralelo, donde por

un lado se realiza la dosificación de una solución de permanganato de potasio y en la unidad restante se efectúa el proceso de oxidación por medio de la incorporación de aire, los cuales operan mediante la generación de un flujo radial gracias al giro de su impulsor-mezclador de manera simultánea. Este proceso crea un vacío que permite la aspiración de aire atmosférico a través de un tubo aspirador, cuyo extremo se encuentra expuesto por encima de la superficie del agua (ETAPA EP, 2023). Actualmente sólo se encuentran operativas las unidades de dosificación de permanganato de potasio.

En estudios previos, mediante un modelo de regresión lineal simple, se estableció que la dosis óptima de permanganato de potasio es de 500 µg/L (Sánchez, 2020). Durante el proceso, el hierro consume gran porcentaje del permanganato de potasio debido a que este metal es más susceptible a la oxidación ya que su potencial de reducción es más bajo que el manganeso, dejando así poco reactivo oxidante para este último. El sistema de aireación fue instalado como una posible solución a este problema para que trabaje simultáneamente con la dosificación del reactivo oxidante y conseguir que el oxígeno presente en el flujo de aire suministrado oxide el hierro, dejando así permanganato de potasio libre para la oxidación de manganeso.

Este estudio se enfocó en estudiar el aporte del sistema de aireadores en la oxidación, así como encontrar la configuración más adecuada con el menor consumo energético considerando condiciones reales de operación.

Objetivos

- Objetivo General

Proponer un diseño de la disposición de un sistema de aireadores para optimizar el proceso de oxidación por dosificación de permanganato de potasio para la remoción de manganeso (II) y hierro (II) del agua cruda en la planta de tratamiento de agua potable Tixán - ETAPA-EP.

- Objetivos Específicos

- Implementar un diseño experimental para optimizar el proceso de remoción de los metales a través de la incorporación de un sistema de aireadores.
- Determinar la secuencia de aireadores que produzca mayor remoción de hierro y manganeso.
- Determinar la secuencia de aireadores que optimice la oxidación de hierro y manganeso con el menor gasto energético considerando que cumpla la normativa.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Agua Segura

El agua es un recurso vital a nivel mundial que desempeña un papel fundamental en la sostenibilidad ambiental actuando sobre la conservación de ecosistemas acuáticos, la biodiversidad y la regulación del clima. Por lo tanto, la protección y purificación del agua son dominantes para preservar el equilibrio ecológico y garantizar un futuro sostenible para las generaciones futuras (Chávez & Alberto, 2018).

El acceso a agua limpia y segura es esencial para la salud humana y la prevención de enfermedades transmitidas por la misma. La calidad del agua, la salud y el crecimiento económico se refuerzan mutuamente y son fundamentales para lograr el bienestar humano y el desarrollo sostenible (Chávez & Alberto, 2018). Las sequías, inundaciones, heladas, ondas de calor u otras condiciones extremas en el cambio climático resultan con frecuencia en la escasez de agua y la creciente amenaza de la contaminación de este recurso agravada por la actividad humana, hacen que la gestión adecuada del recurso sea aún más crítica, por lo que se requiere medidas adaptativas y de mitigación (Landa, Neri & Magaña, 2008). Bajo este contexto, se busca priorizar el tratamiento del agua cruda para la purificación de esta, de tal manera que, para el consumo humano y otras aplicaciones resulte seguro y apropiado bajo los estándares de seguridad y calidad.

El Banco Mundial (2020) estima que en Latinoamérica aproximadamente el 80% de las aguas residuales tienen un retorno a los ríos sin un tratamiento de purificación previo, provocando un aumento del índice de contaminación de este recurso hídrico natural. Tomando en cuenta que la principal fuente de abastecimiento para las plantas de tratamiento de aguas de las ciudades de América Latina son los ríos, es prioritario un tratamiento efectivo que asegure la preservación del agua (Banco Mundial, 2020).

Otro problema común en aguas naturales usadas como fuente de potabilización es la presencia de metales de fuentes antropogénicas, ya sean industriales o urbanas. Por ejemplo, en la región andina las principales fuentes naturales de metales en el agua son la meteorización, el lixiviado de las rocas o emisiones volcánicas. En consecuencia, la mayoría de los metales pesados liberados al ambiente llegan a los sistemas acuáticos a través de descargas directas, precipitación húmeda o seca y erosión (Rizzo et al., 2010).

Considerando la importancia de mantener la calidad del agua, el objetivo de desarrollo sostenible 6 (ODS 6), es “Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos” (ONU, 2023). Su propósito principal se centra en mejorar la calidad del agua para lograr un acceso mundial y seguro, lo cual es esencial para la salud humana y el desarrollo sostenible.

1.2 Potabilización del agua

La norma INEN 1118 (2014), define el agua potable como aquella que ha sido tratada y se le han cambiado sus propiedades físicas, químicas y biológicas, con el propósito de cumplir con los estándares de calidad establecidos por las autoridades sanitarias, y es segura para el consumo humano sin riesgo significativo de efectos adversos para la salud humana.

1.2.1 Captación

La captación de agua se define como el proceso para obtener agua de fuentes naturales, mediante la recopilación y almacenamiento de recursos hídricos como aguas subterráneas, lagos y especialmente ríos, y someterla a diversos tratamientos con el propósito de utilizarla de manera beneficiosa, garantizando su calidad para el consumo humano (Orellana, 2005). La captación implica la recolección de agua y el debido transporte a tanques de reservorio, las mismas que son por conducción por gravedad, por conducción por bombeo y por aducción, para su posterior potabilización y distribución (Espinoza, 2023). El proceso de potabilización consta de varias etapas, las cuales se mencionan a continuación:

1.2.1.1 Conducción por gravedad

El sistema de conducción por gravedad aprovecha la inclinación natural del terreno para facilitar el flujo de agua a través de tuberías o canales sin necesidad de utilizar bombas. El transporte se realiza desde el punto de captación hasta el lugar de consumo utilizando la fuerza de la gravedad (CONAGUA, 2014).

1.2.1.2 Conducción por bombeo

Este sistema implica el uso de bombas para trasladar el agua desde el lugar de origen hasta la planta. Es necesario aplicar cuando no hay una pendiente natural adecuada para permitir el flujo por gravedad o cuando es necesario elevar el agua a altitudes considerables (CONAGUA, 2014).

1.2.1.3 Conducción por aducción

La conducción de agua por aducción se realiza a través de un sistema de tuberías, desde una fuente de suministro hacia un punto de consumo. Este método implica el movimiento del agua a lo largo de una estructura o conducción (CONAGUA, 2014).

1.2.2 Coagulación y Floculación

Uno de los tratamientos determinantes para la calidad del agua en el proceso de tratamiento es la coagulación. Esta elimina eficientemente diversos contaminantes como sólidos dispersos, materia orgánica, coloides de tamaño de 10 nm a 1 μ m y generalmente mayores a 1 μ m (Gheraout, 2020).

El mecanismo se basa en la desestabilización de las partículas para favorecer su aglomeración, mediante la neutralización de las cargas de las impurezas coloidales. La mezcla rápida, la floculación y la química del coagulante son factores que determinan la eficiencia de la coagulación. (Edzwald et al., 1989). Generalmente, los coagulantes inorgánicos más empleados en relación precio y eficiencia son el sulfato de aluminio, sulfato férrico y cloruro férrico (Abdel Ghany & Mahmoud, 2019).

La floculación está muy ligada a la coagulación, la cual consiste en la adición de compuestos orgánicos denominados floculantes, los mismos que aglomeran las partículas pequeñas dispersas desestabilizadas en un medio acuoso para formar agregados más grandes (Brostow et al., 2009), llamados flóculos y que sedimenten con mayor eficiencia. Los floculantes existentes son a base de polímeros orgánicos o naturales biodegradables, los cuales tienen mejor eficiencia en dosis bajas. También existen polímeros inorgánicos rentables, pero presentan limitaciones debido a la baja eficacia de floculación (Sun, 2021).

1.2.3 Sedimentación

La sedimentación es un proceso físico que involucra el asentamiento de las partículas sólidas por la diferencia de densidad existente con el medio en el que se están sedimentando, en este caso, agua. Por lo que, las partículas cuya densidad sea mayor a la del agua se depositarán en el fondo de los tanques de sedimentación por un simple efecto de la gravedad (Maier et al., 2009).

Usualmente, para este proceso se requieren piscinas o tanques de gran longitud y área (Sutherland, 2009). Además, se caracteriza por ser una operación de separación muy eficiente en relación a su consumo energético que se considera relativamente bajo. Debido a esta última

condición la sedimentación por gravedad es ampliamente usada en el tratamiento de agua potable, así como también en procesos de aguas residuales municipales e industriales, entre otros (Sutherland, 2009).

1.2.4 Filtración

La filtración es la operación inmediata a la sedimentación, en donde se busca eliminar las partículas que se encuentran suspendidas en el agua (Maier et al., 2009). Se pueden aplicar diferentes medios filtrantes, con componentes, espesores y diámetros variables que deberán ser afines a los compuestos que se deseen eliminar. Comúnmente, la filtración rápida emplea como medio filtrante arena o antracita, con un espesor de 50 a 75 cm y con un diámetro de 0.5 a 1 mm (Maier et al., 2009).

Al cumplir con su ciclo, los filtros deben ser limpiados para remover las partículas y compuestos retenidos en él, es de suma importancia que este proceso se cumpla para asegurar el correcto funcionamiento del filtro y, sobre todo, la efectividad del proceso (Maier et al., 2009).

Realizar un tratamiento en conjunto que incluya coagulación, floculación, sedimentación y filtración es fundamental para reducir significativamente la presencia de partículas no deseadas y diversos contaminantes en el agua. Este proceso permite cumplir con parámetros de calidad esenciales para el consumo, como la reducción de la turbidez, y facilita la evaluación de la eficacia del proceso de desinfección (Maier et al., 2009).

1.2.5 Desinfección

Es una etapa esencial en el tratamiento de agua para la eliminación de microorganismos patógenos que ocasionan enfermedades en la salud humana (Ramírez, 2015). La cloración es la técnica más común y rentable, siendo así el cloro el más utilizado para tratar el agua potable. Sin embargo, se emplean otros oxidantes como el ozono. Además, pueden utilizarse métodos físicos como la luz ultravioleta (UV), siendo su principal ventaja el no dejar residuos en el agua (Tarhan, 2019).

1.2.6 Control de calidad

Seguidamente de los tratamientos físicos y químicos se realiza el control de calidad de manera continua y rigurosa (LeChevallier, 2013). Esta etapa parte de la toma de muestras de agua tratada para luego ser sometidas a pruebas microbiológicas, físicas y químicas en el laboratorio para evaluar su calidad, tales como: temperatura, pH, dureza, oxígeno disuelto, metales pesados y nitratos, así como la detección de microorganismos indicadores y patógenos.

Posteriormente, los resultados son comparados con normas de calidad del agua establecidas por entidades internacionales o locales. En caso de que se ajusten, es decir, cumplan con la norma, el agua se considera apta para su uso, caso contrario, se llevan a cabo las acciones pertinentes para su tratamiento y purificación (Weber, 2021).

1.3 Manganeso y hierro en el agua

El hierro y el manganeso son metales que se encuentran en abundancia en la corteza terrestre. Cuando el agua se infiltra a través del suelo y las rocas, puede interactuar con estos minerales y disolverlos, permitiendo que se trasladen hacia las capas de agua subterránea (McFarland & Dozier, 2004). Además de este proceso natural, es importante destacar que las tuberías hechas de hierro pueden experimentar corrosión con el tiempo, lo que puede resultar en la liberación de partículas de hierro en el agua (McFarland & Dozier, 2004). Esta liberación de hierro y manganeso en el agua cruda puede tener un impacto significativo en la calidad del agua y, por ende, es un aspecto crítico a considerar en la gestión del tratamiento y suministro de agua (Marsidi et al., 2018).

1.3.1 Manganeso

El manganeso es un oligoelemento esencial, se encuentra presente de forma natural en la corteza terrestre, constituye una parte esencial de la composición química y contenido mineral de diversas fuentes, como rocas, suelos y cuerpos acuáticos. Su papel fundamental se extiende tanto a los procesos biológicos como a las prácticas agrícolas, donde su participación se revela como un componente clave para el desarrollo de plantas y la salud humana (Valencia, 2011).

Las razones detrás de la presencia de manganeso en el agua pueden atribuirse en gran medida a su abundancia natural en el suelo y las rocas (Negrón, 2014). Importantes cantidades de manganeso proceden de la lixiviación y arrastre de minerales de ferromanganeso o de otros que contienen manganeso como la pirolusita, ocre negro o manganita que aumentan la concentración de manganeso en los cuerpos de agua, contribuyendo a la complejidad de la gestión del recurso hídrico (Negrón, 2014). Además, el proceso de descomposición de animales acuáticos y organismos vegetales, especialmente algas azul-verde, diatomeas y plantas acuáticas superiores contribuye a la concentración del metal en el agua (Mazunina & Leonidovna, 2015).

Este metal es uno de los contaminantes más comunes presentes en el agua, este fenómeno no solo se traduce en alteraciones visibles y de sabor en el agua, sino que también plantea desafíos adicionales relacionados con el manchado de ropa y accesorios, la turbidez y, en

niveles elevados, la presencia de un sabor metálico (Kohl, 2006). Además, la presencia de este metal puede crear condiciones óptimas para el crecimiento de ciertos microorganismos tolerantes al cloro (Kouzour et al., 2017), tales como: *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Legionella*, *Pseudomonas* y *Sphingomonas* (Ocampo-Rodríguez et al., 2022).

Es esencial destacar que estas implicaciones estéticas y de sabor no deben pasar desapercibidas, ya que afectan la percepción del agua e influyen en la aceptación y preferencia del consumidor. Respecto a esto, se considera que valores que excedan los 0.1 mg/L pueden influir directamente en las características organolépticas del agua, manifestándose en colores indeseados, como tonos oscuros de negro o rojo, con implicaciones estéticas (Kohl, 2006). Sin embargo, según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), concentraciones menores se consideran aceptables para los consumidores. Por otro lado, se ha considerado que una concentración de 0.2 mg/L de manganeso en los cuerpos acuáticos tiene la capacidad de formar capas en las tuberías con gran facilidad, lo que provoca desprendimientos en forma de precipitados negros (OMS, 2018).

Las concentraciones de manganeso que superen los 0.5 mg/L pueden tener efectos perjudiciales en la salud humana (Rezzano et al 2008). En Mazunina & Leonidovna (2015) y Kondakis et al (2010), se menciona que los efectos nocivos provocados por este metal se ven afectados en el sistema sanguíneo, el tracto gastrointestinal, los riñones, el sistema óseo, el sistema inmunitario, los procesos oxidativos-antioxidantes y metabólicos, problemas neurológicos, como déficits cognitivos (OMS, 2018).

Este panorama subraya la necesidad de implementar estrategias efectivas de monitoreo y tratamiento de agua que no solo cumplan con los estándares reguladores establecidos, sino que también aborden las preocupaciones estéticas y sensoriales asociadas con la presencia de manganeso (ENCA, 2016).

Un enfoque integral en la gestión del manganeso en el suministro de agua potable es esencial para garantizar la calidad del agua y, por ende, la salud y bienestar continuos de la población (ENCA, 2016).

1.3.2 Hierro

Desde una perspectiva química, el hierro se clasifica dentro del grupo de metales de transición en la tabla periódica. Este metal es especialmente notable por su abundancia tanto en el núcleo de la Tierra como en su corteza terrestre (Valencia, 2011). Usualmente la existencia de concentraciones elevadas de este metal en el agua se da debido a residuos de procesos

industriales, corrosión de equipos y tuberías (comúnmente fabricados con acero) puede dar lugar a problemas de contaminación en el agua que fluye a través de estos sistemas (OMS, 2018). Otro motivo de la presencia de hierro es el desgaste de rocas y minerales, principalmente óxidos como la hematita, magnetita y limonita, sulfuros, carbonatos y silicatos en condiciones anaeróbicas en presencia de agentes reductores como la materia orgánica, que diluyen los iones de hierro por el arrastre propio causado por el agua (Marsidi et al., 2018).

El hierro desempeña un papel crucial en la hemoglobina sanguínea, siendo esencial para funciones biológicas fundamentales (Valencia, 2011). A pesar de su importancia nutricional y de ser indispensable en la dieta humana, la presencia excesiva de hierro en el agua puede traer consigo consecuencias desfavorables (Valencia, 2011). Una presencia excesiva puede alterar notablemente sus propiedades organolépticas del agua, afectando su olor y color, y al igual que con el manganeso, en cantidades elevadas de hierro se promueve la creación de un hábitat próspero para el crecimiento de ciertas bacterias (OMS, 2018). La comprensión de estas variaciones de concentración es esencial para implementar estrategias efectivas de tratamiento del agua y garantizar la seguridad y calidad del suministro para la población (Valencia, 2011).

Las concentraciones de hierro en fuentes naturales de agua varían, se encuentran típicamente alrededor de 0.5 mg/L en aguas superficiales. No obstante, en aguas subterráneas, este valor puede experimentar aumentos representativos, superando en ocasiones los 10 mg/L (Valencia, 2011). Este fenómeno se atribuye al mayor contacto de las aguas subterráneas con materia orgánica y material mineral, lo cual dificulta su eliminación o proceso de potabilización.

Por lo tanto, la relevancia de controlar la concentración de hierro en el suministro de agua potable se destaca aún más al considerar sus posibles impactos en la salud humana motivando la implementación de procesos de tratamiento de agua potable que priorizan la eliminación efectiva del hierro (Negrón, 2014). La OMS menciona que la ingesta de hierro generalmente no presenta un riesgo considerable para la salud al ser un mineral esencial necesario para diversas funciones corporales por lo que no se establece ningún valor de referencia para este metal en el agua de consumo (OMS, 2023). Sin embargo, concentraciones superiores a 10 mg/L, a largo plazo pueden contribuir a la formación de cálculos renales, enfermedades cardiovasculares (Toxqui et al., 2010) y la interferencia con la absorción de otros nutrientes esenciales. Asimismo, los autores Chaturvedi & Dave (2012), mencionan que la presencia de hierro en el agua causa principalmente problemas en sus propiedades estéticas.

1.3.3 Normativa Nacional: concentraciones de hierro y manganeso

El agua, al ser un recurso esencial de consumo masivo tanto para la elaboración de alimentos como para el consumo humano directo, debe cumplir con estrictas normativas que garanticen su calidad y, por ende, la salud y bienestar de quienes la consumen. En Ecuador, la entidad responsable de supervisar de manera integral la gestión del agua potable es la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), cuya función principal es establecer y hacer cumplir los estándares de calidad del agua en el país (ENCA, 2016).

La normativa relacionada con la calidad del agua se apoya en diferentes marcos legales, Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) para el agua potabilizada y el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) para el agua fuente. Estos organismos juegan un papel crucial al establecer los criterios y parámetros que rigen la calidad del agua destinada al consumo humano y doméstico.

De manera más precisa, en el Anexo A del Libro VI del TULSMA (2015) se detallan los criterios específicos para las aguas de consumo humano y uso doméstico que requieren desinfección para su potabilización. Según estos estándares, la concentración permitida de hierro total es de 0.3 mg/L. Mientras que para el manganeso se establece un límite de 0.1 mg/L, basado en los criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en diversos tipos de aguas, ya sean dulces, frías o cálidas, así como en aguas marinas y de estuarios, según el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (2015).

Las concentraciones de Mn y Fe establecidas en el TULSMA coinciden en la norma INEN 1108 (2006). Sin embargo, actualmente el manganeso y hierro no se encuentran normados en la última versión de INEN (2022). No obstante, la OMS estipula que para agua potable la concentración máxima permisible para hierro es de 0.3 mg/L, y se menciona que por debajo de estos valores no se aprecian afecciones al sabor, aunque se ha observado que puede aumentar la turbiedad y coloración del fluido. Asimismo, se ha establecido como concentración máxima para el manganeso 0.1 mg/L con el fin de evitar la aparición de sabores y coloraciones que puedan manchar accesorios y ropa. Además, la OMS también asegura que sobrepasar estas concentraciones da lugar a la formación de depósitos de estos metales en los sistemas de distribución. Sin embargo, no se han establecido concentraciones exactas que puedan llegar a afectar a la salud de los consumidores de manera severa (OMS, 2018).

1.3.4 Oxidación para la remoción de metales

Al encontrarse generalmente en su forma soluble debido al pH neutro del agua, se emplean métodos de oxidación para que los elementos pasen a sus formas insolubles, respectivamente el Fe^{+2} se convierte en hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) (Cárdenas et al., 2014) y el Mn^{+2} se transforma a dióxido de manganeso (MnO_2) (Valentini et al., 2022).

Raveendran et al (2002) indica que existen diversos métodos de oxidación de hierro y manganeso, tales como el cloro gaseoso, aireación, hipoclorito de sodio, permanganato de potasio, etc. Sin embargo, cada método presenta dificultades en el transcurso de su reacción con los metales.

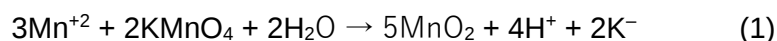
La oxidación del manganeso y hierro se lleva a cabo mediante el uso del reactivo permanganato de potasio (KMnO_4), pasando de sus estados divalentes a sus formas insolubles (Espinoza, 2023). Se ha demostrado que el uso de permanganato para la oxidación de hierro y manganeso presenta diversas ventajas como su precio moderado y su baja toxicidad. Además, elimina el sabor y olor no deseado del manganeso, hierro, bacterias y sulfito de hidrógeno (Phatai et al., 2014).

Espinoza (2023), expone que la aireación es un proceso en el cual se busca aumentar el área de contacto con el aire de tal forma que el intercambio de compuestos gaseosos sea más factible. Por ende, este tratamiento es un complemento a la oxidación con permanganato de potasio. De esta forma, elementos como el hierro y el manganeso logran oxidarse debido al oxígeno presente en la corriente del aire suministrado.

1.3.5 Oxidación con permanganato de potasio

Los estudios realizados mencionan que el permanganato de potasio es un fuerte agente oxidante tanto en estado sólido como en solución acuosa, presenta un color violeta intenso y es muy empleado en el tratamiento de aguas para oxidar metales y contaminantes existentes. Este reactivo da solución a la problemática de sabores y olores desagradables producidos por estos metales y evita la formación del compuesto cancerígeno trihalometano (THM), al descomponer la materia orgánica natural (Raveendran et al., 2002).

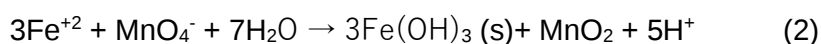
La reacción estequiométrica de oxidación de manganeso con permanganato de potasio es la siguiente (Raveendran et al., 2002):



En la reacción 1, se observa como este compuesto químico oxida el manganeso divalente (Mn^{2+}) a manganeso tetravalente (Mn^{4+}), a través de una serie de reacciones químicas que concluyen con la generación de oxihidróxidos complejos de manganeso, específicamente $\text{MnO}(\text{Mn}_2\text{O}_3) \cdot (x\text{H}_2\text{O})$ los mismos que son insolubles (Espinoza, 2023).

Teóricamente, para eliminar 1 ppm de manganeso, se necesitaría 1.92 ppm de permanganato de potasio. Sin embargo, el dióxido de manganeso formado en la reacción posee una alta acción catalítica que influye en la práctica, haciendo que se requiera una dosis inferior a la requerida estequiométricamente (Medialdea et al., 2005).

Como afirma Palavecino (2009), el KMnO_4 ha sido empleado para eliminar hierro mediante una reacción redox en la que el hierro se oxida mientras que el permanganato de potasio se reduce.



En la reacción 2, se da la formación de hidróxido férrico sólido ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) insoluble a partir de hierro divalente (Fe^{+2}), mientras que el ion permanganato se reduce a dióxido de manganeso (MnO_2). De la misma manera, para cada parte de Fe^{+2} se requiere 0.94 partes de KMnO_4 , pero la cantidad para oxidar completamente el hierro soluble es siempre inferior, esto se debe a la acción catalítica del dióxido de manganeso (Medialdea et al., 2005).

El control de pH es importante debido a que el manganeso en su forma insoluble (Mn^{+2}) tiene una velocidad de oxidación tardía; por tanto, un elevado pH favorece a la velocidad de reacción del elemento con el medio oxidante, la cual es directamente proporcional a las condiciones de este parámetro. De tal modo que, el pH óptimo del medio acuoso debe ser mayor a 9.5 para que el método de oxidación por aireación sea efectivo (Barrera, 2017).

1.3.6 Aireación con uso de aireadores

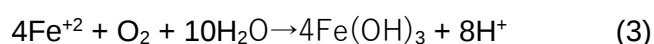
Las concentraciones altas de hierro manganeso pueden ser tratadas con un sistema de aireación (McFarland & Dozier, 2004). Ras (2000), expone que la aireación es un proceso de transporte de sustancias, la cual introduce oxígeno al agua, ya sea de forma natural (cascadas) o artificial (agitación mecánica o burbujeo de aire comprimido) para la eliminación de metales. Básicamente, el agua entra en contacto con el aire para llevar a cabo este proceso con la finalidad de suministrar oxígeno a los microorganismos presentes en un sistema, permitiendo de esta manera la degradación de compuestos orgánicos perjudiciales. Además, la aireación es un proceso que permite eliminar gas metano (CH_4), gas cloro (Cl_2), remover sustancias

volátiles y, especialmente, llevar a cabo la remoción de metales pesados como el hierro y manganeso (López, 2016).

La concentración de oxígeno presente en el flujo de aire suministrado por los aireadores es de vital importancia, ya que, al ser el elemento fundamental para la oxidación de los metales debe cumplir con condiciones específicas para asegurar que el proceso se lleve a cabo con éxito (Guillen et al., 2021). El oxígeno suministrado por el aireador reacciona con las formas solubles de hierro y manganeso (Fe^{+2} y Mn^{+2}) del agua cruda, si este es suficiente el manganeso y hierro se oxidan hasta Mn^{+4} , Fe^{+3} , respectivamente, logrando que se encuentre de manera insoluble y logre separarse de la corriente de agua (Guillen et al., 2021).

Por otro lado, si esta concentración del oxidante disminuye, la capacidad de oxidación se ve afectada desfavorablemente, por lo que el metal regresa a su forma soluble Mn^{+2} , lo mismo ocurre para el hierro (Valentini et al., 2022). Sin embargo, únicamente la aireación no puede oxidar por completo al manganeso ya que es ineficaz para oxidar el metal ligado orgánicamente y demandaría un gran suministro de aire lo que ocasiona una alta demanda energética y económica para las plantas de tratamiento (Valentini et al., 2022).

Como indica López (2016), las reacciones de oxidación utilizando aireación en presencia de hierro y manganeso se detallan en la reacción 3 y reacción 4:



Dada la estequiometría 4 moles de hierro reaccionan con 1 mol de oxígeno, lo que significa que, para oxidar 1 ppm de hierro se requiere 0.14 ppm de oxígeno disuelto. De igual forma, 6 moles de manganeso reaccionan con 3 moles de oxígeno, concluyendo que para oxidar 1 ppm de manganeso se requiere 0.29 ppm de oxígeno (Burbano & Sánchez, 2018).

1.4 Estudios de optimización mediante diseño experimental

1.4.1 Selección del tipo de muestreo

La elaboración de un diseño experimental dependerá de la calidad y veracidad de los datos obtenidos en la toma de muestras, por lo que se inicia con la planeación de un muestreo que sea acorde a los objetivos planteados en el análisis. El muestreo es un conjunto de operaciones cuyo objetivo es la selección, cuantificación y obtención de información relevante de una parte

de la población. Se dice que la selección se aplica a las unidades que conforman al muestreo mientras que la cuantificación tiene una connotación directa a la variable de interés del estudio (Patil, 2011). Según Ramsey (2015), con respecto a términos de heterogeneidad, el agua no difiere ante los materiales sólidos, por lo que tomar una muestra representativa es una prioridad. Además de la representatividad, otro objetivo del muestreo es que otorgue la información suficiente para poder realizar al análisis de estudio para el cual se aplica el muestreo (Patil, 2011).

Existen varios tipos de muestreo, sin embargo, los más usados para la toma de muestra de agua es el muestreo simple y el muestreo compuesto. Una muestra compuesta es el resultado de la mezcla de diversas muestras simples o individuales, formando así una sola muestra en donde se busca obtener todas las características semejantes de cada una de las muestras individuales que la conforman (Patil, 2011).

Parker (1994), establece que la toma de muestras puede ser mediante un dispositivo llamado “grab sampler”, que consiste en un recipiente o contenedor que será introducido en el cuerpo o columna de agua hasta que este se llene y luego se retire del tanque.

El tipo de muestreo seleccionado depende principalmente de las propiedades de los componentes que se encuentran dispersos en el agua, lo que resulta en una selección detallada de los materiales y técnicas de muestreo. Los criterios de calidad de muestras, tienen requerimientos obligatorios que se deben seguir al momento de realizar un muestreo (Ramsey, 2015).

1.4.2 Selección del análisis estadístico

Existen diferentes métodos y estudios estadísticos para la elaboración de un diseño experimental, entre estos, la técnica ANOVA, conocida también como análisis factorial y desarrollada por Fisher en 1930 (Amat, 2016), es una técnica estadística que realiza un análisis de comparación entre valores y evalúa la existencia de variación entre las medias de dos o más tratamientos diferentes de manera simultánea (Dagnino, 2014).

Para que los resultados del análisis ANOVA sean válidos, es fundamental verificar dos supuestos:

La normalidad, una de las formas para evaluarla es visualmente mediante gráficos Q - Q, expone que todos los datos de cada grupo deben seguir una distribución normal, es decir, seguir la tendencia diagonal. Si los residuos no son normales, el p value obtenido puede reflejar con imprecisión la probabilidad de cometer un error tipo I (falsamente rechazar la hipótesis nula). El

supuesto de homocedasticidad o igualdad de varianzas implica que las varianzas de los grupos que se están comparando deben ser aproximadamente iguales. Si se presentan diferentes varianzas, el error estándar de los estimadores puede estar sesgado, lo que afecta la exactitud de los cálculos del valor p value y los intervalos de confianza (Montgomery, 2004).

Comúnmente, el ANOVA de un factor es empleado cuando existe un único factor independiente y el fin es investigar si las variaciones de este factor poseen efecto medible sobre la variable dependiente. De este análisis parten dos hipótesis conjuntamente, la hipótesis nula (H_0) que postula que la media de la variable estudiada es igual para los diferentes grupos, en contraste con la hipótesis alternativa (H_a) que sugiere que al menos dos medias presentan diferencias significativas. En primera instancia, la media de cada uno de los grupos es calculada para comparar la varianza de las mismas. De esta forma, ANOVA compara múltiples medias, mediante el análisis de las varianzas (Amat, 2016).

Este análisis de varianza resume la información en una tabla ANOVA, en esta tabla se presenta los cálculos de las sumas de los cuadrados de cada fila, sus grados de libertad, el error cuadrático medio del factor y del error; además, el estadístico de la prueba ANOVA que es igual al cociente de los errores cuadráticos (Ruiz, 2009).

Por lo tanto, las fórmulas para la tabla ANOVA son las siguientes (Figura 1); en donde n_i es el tamaño de la muestra i ; N es el número total de observaciones; k es el número de grupos diferentes del análisis de la varianza; y_{ij} es el valor j del grupo i ; $\bar{y}_i$ es la media del grupo i ; $\bar{y}$ es la media de todos los datos analizados (Ruiz, 2009).

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Factor	$SS_F = \sum_{i=1}^k n_i \cdot (\bar{y}_i - \bar{y})^2$	$k - 1$	$MSE_F = \frac{SS_F}{k - 1}$	$F = \frac{MSE_F}{MSE_E}$
Error	$SS_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$N - k$	$MSE_E = \frac{SS_E}{N - k}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$N - 1$		

$$N = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_k$$

Figura 1. Fórmulas de la tabla ANOVA de un factor.

Posteriormente, si se presentan diferencias estadísticamente significativas en el ANOVA se complementa el estudio con una prueba Post hoc, la que nos indica en qué tratamientos se presentan dichas diferencias. Se recomienda que todos los resultados de ANOVA sean complementados con una prueba Post hoc, indistintamente de los tipos de comparaciones que se hayan hecho en el estudio (Lee & Lee, 2018).

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de Estudio

Este estudio se realizó en la planta de tratamiento de agua potable Tixán que se encuentra ubicada en la ciudad de Cuenca (Ecuador) en la parroquia de Chiquintad, la cual está localizada en las coordenadas 2°50'01"S 78°59'30W, a una altitud de 2690 m. La principal fuente de abastecimiento de agua para la planta proviene del río Machángara.

En la planta, el proceso de tratamiento inicia mediante la captación de agua cruda del río Machángara, el cual utiliza una estructura civil propia de la planta de Tixán llamada "Captación Chiquintad" para captar agua del río Machángara, la cual se emplearía cuando la Central Hidroeléctrica de Saymirín esté en mantenimiento o presente algún inconveniente (Figura 2). Independientemente del método de captación, desde esta estructura, el agua cruda puede ser dirigida hacia la planta de Tixán de dos formas: mediante el canal de junta de riego del río Machángara o a través de una conducción cerrada desde Saymirín hasta Tixán por medio de tuberías (Espinoza, 2023). Debido a que es agua que proviene de las montañas tiene una carga natural importante de hierro y manganeso.

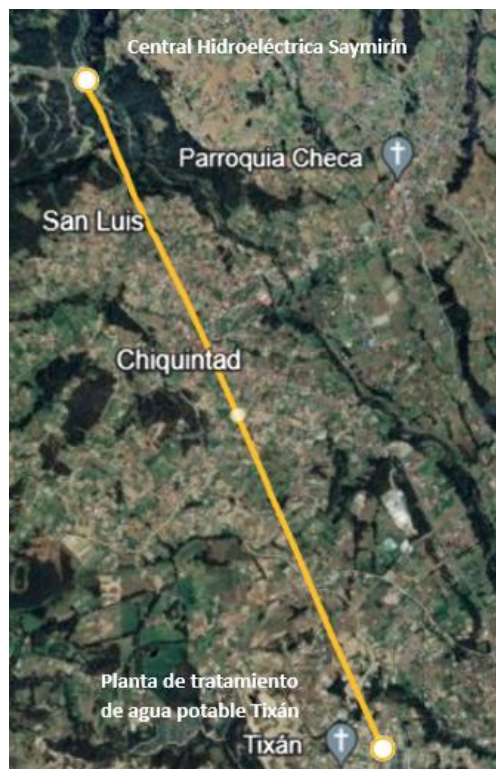


Figura 2. Ubicación de la Central hidroeléctrica Saymirín y la Planta de tratamiento de agua Tixán.

2.2 Proceso de oxidación de hierro y manganeso en la planta Tixán

Dentro de la planta de Tixán se cuenta con una etapa que corresponde a la oxidación de estos metales mediante la dosificación de permanganato de potasio (Figura 3), juntamente con aireación mediante un sistema de aireadores, como se observa en las figuras 4 y 5.



Figura 3. Dosificación de la solución de permanganato de potasio para el agua cruda.

La distribución de la planta cuenta con dos unidades de pretratamiento ubicados en paralelo, en donde se lleva a cabo la oxidación mediante la incorporación de aire junto con el suministro de permanganato de potasio. Las unidades de tratamiento que contienen el agua poseen vertederos cuya longitud es equivalente al ancho de las unidades. Cada unidad de oxidación cuenta con tres compuertas tipo vertederos, con el fin de poder controlar el paso de agua a la unidad.

La determinación de la dosis óptima de KMnO_4 para el proceso de oxidación fue realizada a través de un estudio preliminar donde se probaron las siguientes concentraciones: 120, 240, 300, 400, 450 y 500 $\mu\text{g/L}$ (Sánchez, 2020). Cada dosis fue evaluada con respecto a su eficiencia oxidativa, con el objetivo de identificar la dosis que proporcione resultados óptimos de remoción en función de las concentraciones de hierro y manganeso. Finalmente, se consideró que la dosificación es independiente de la concentración de los elementos metálicos en el caudal de ingreso. Como resultado del estudio se fijó como dosis suministrada al inicio del tanque de oxidación un valor constante de 500 $\mu\text{g/L}$ (Sánchez, 2020).

Este reactivo oxidante es añadido a los tanques de oxidación por medio de flautas. Se recomienda que el método de aireación se aplique para corrientes de agua que presenten concentraciones de hierro superiores a 5 mg/L (OPS, 2005), en complemento a la oxidación mediante reactivos, con el fin de lograr una disminución en los costos de los reactivos.

En la sección de oxidación, se encuentran instalados 5 pares de aireadores sumergidos, distribuidos equitativamente entre las dos unidades de pretratamiento que operan en paralelo. Estos aireadores tienen la función de proporcionar oxígeno y agitar el agua para mantener en suspensión las partículas y precipitados formados durante el proceso de oxidación del hierro y el manganeso (Espinoza, 2023).



Figura 4. Vista frontal de los aireadores encendidos.



Figura 5. Vista lateral de los aireadores encendidos.

Por lo tanto, los aireadores de la planta de Tixán proporcionan un flujo radial gracias al giro de impulsor – mezclador, lo que crea un vacío y el aire logra ingresar por el tubo aspirador sobre la superficie de agua. Simultáneamente, el equipo absorbe agua por la parte inferior y da lugar a la mezcla de fluidos (líquido – gas).

El objetivo de aplicar conjuntamente estas técnicas (permanganato de potasio y aireación) es asegurar la oxidación adecuada de hierro y manganeso para la eliminación mayoritaria o total de los olores y sabores no deseados como un efecto de la existencia de estos metales.

2.3 Diseño experimental

El diseño de un factor consistió en combinaciones de los 5 pares de aireadores, obteniendo un total de 26 tratamientos dispuestos de la siguiente manera: 5 tratamientos simples, esto significa que solo funcionará un par de aireadores (fila) a la vez; 10 tratamientos dobles funcionando dos pares de aireadores a la vez, 10 tratamientos triples, es decir, empleando tres pares de aireadores a la vez. Inicialmente, se realizó un tratamiento como blanco usando únicamente la dosificación del permanganato de potasio para evaluar la efectividad sin el efecto de la aireación.

Los pares de aireadores empleados para cada tratamiento propuesto se encuentran detallados en la Tabla 1.

Tabla 1. Pares de aireadores empleados en cada tratamiento.

N° de Tratamiento	Pares de aireadores encendidos
1	Ninguno
2	1
3	2
4	3
5	4
6	5
7	1 - 2
8	1 - 3
9	1 - 4
10	1 - 5
11	2 - 3
12	2 - 4
13	2 - 5
14	3 - 4
15	3 - 5
16	4 - 5
17	1 - 2 - 3
18	1 - 2 - 4
19	1 - 2 - 5
20	1 - 3 - 4
21	1 - 3 - 5
22	2 - 3 - 4
23	2 - 3 - 5
24	1 - 4 - 5
25	2 - 4 - 5
26	3 - 4 - 5

Además, se descartaron las combinaciones que incluyen a cuatro pares de aireadores y el tratamiento con los cinco pares, debido a la demanda energética elevada. En la figura 6 se puede observar la disposición del conjunto de 10 aireadores dentro de la planta de tratamiento de agua Tixán.

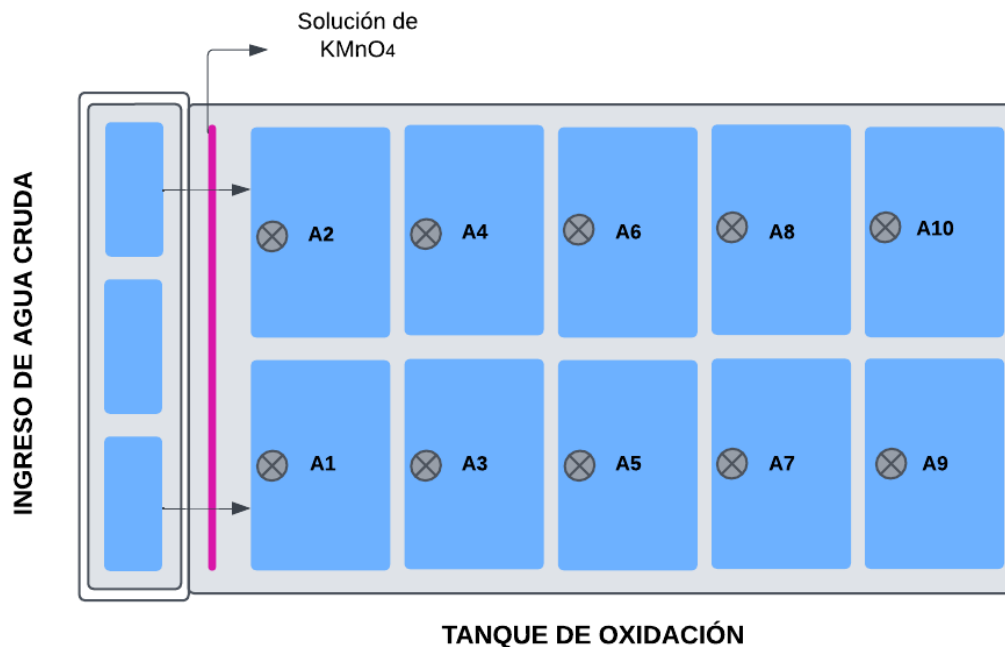


Figura 6. Esquema de disposición de aireadores en la recepción de agua del río Machángara de la planta de TIXÁN.

2.4 Definición de los puntos de muestreo

Los puntos de muestreo, previamente establecidos por el personal técnico de la planta de agua Tixán, se ubicaron en los lugares estratégicos basados en el diagrama de flujo de la planta, lo cual permitió evaluar adecuadamente las cinco etapas esenciales del sistema. La selección consideró factores relevantes, como la adición de reactivos y la finalización de procesos fisicoquímicos que influyen en las concentraciones de hierro y manganeso, asegurando la representatividad de los datos obtenidos.

Estos puntos se distribuyeron en los dos módulos de la planta, que operan simultáneamente bajo las mismas condiciones, para asegurar la representatividad de la toma de muestras. En total, se establecieron 9 puntos de muestreo, como se muestra en la Figura 7.

Además, se establecieron intervalos de tiempo específicos de 45 minutos entre cada toma de muestra. Los pares de aireadores en los tratamientos compuestos se activan simultáneamente, de tal manera que el agua se somete a la oxidación por aireación y bajo el suministro de permanganato de potasio con un tiempo de residencia promedio de 40 minutos.

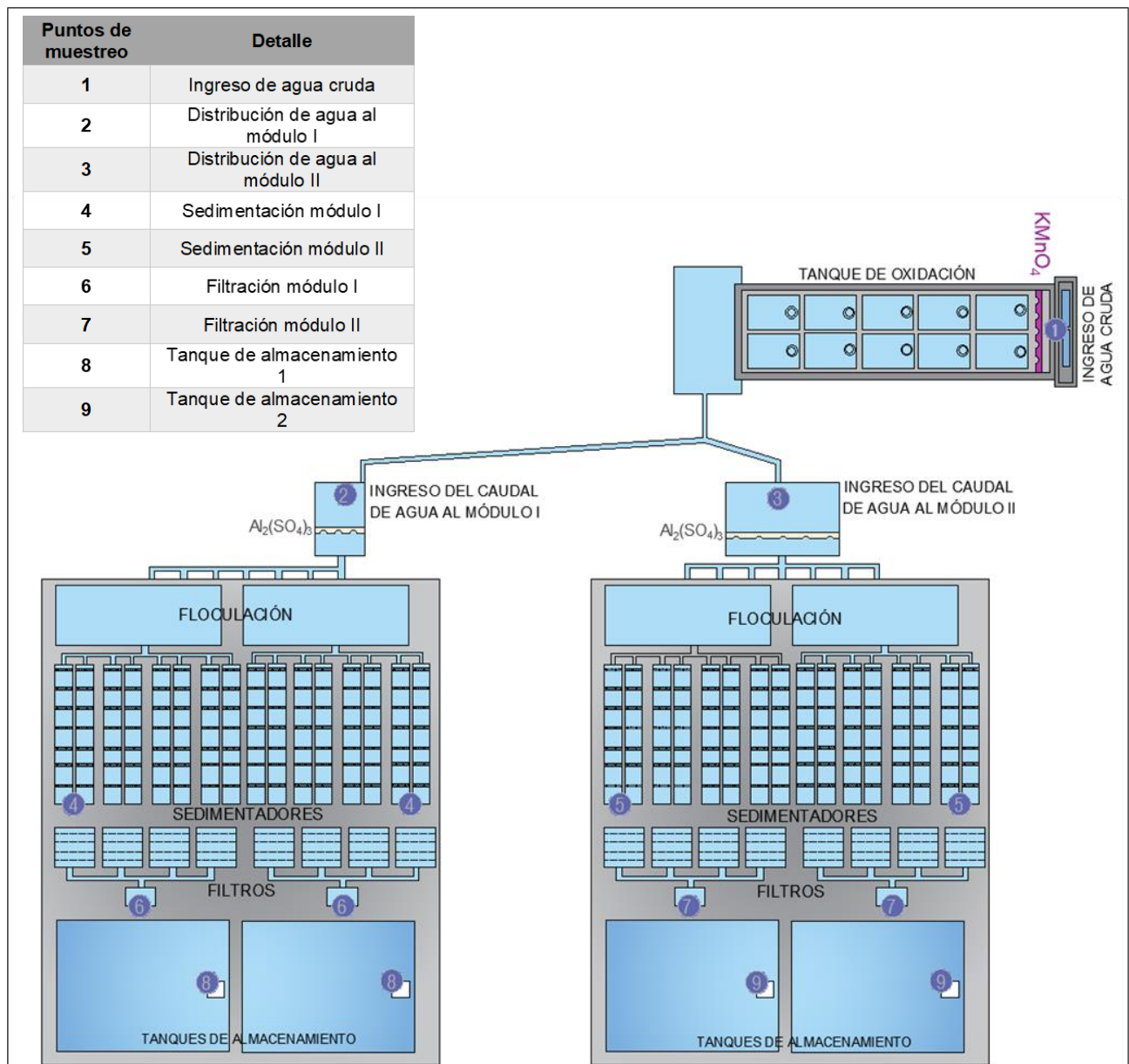


Figura 7. Diseño del sistema de tratamiento de agua en la planta Tixán y ubicación de los puntos de muestreo.

2.5 Recolección de muestras

Se tomaron muestras de cada tratamiento, se utilizaron 9 envases de plástico de 50 mL. La norma INEN 2169 (2013), indica que para la conservación de la muestra se adiciona 5 gotas de ácido nítrico 0.2 N.

Se realizó un muestreo simple en todos los puntos de tratamiento, recolectando una única muestra en el punto del agua cruda y los puntos de distribución a los módulos. No obstante, en la etapa de sedimentación, la cual está conformada por 16 tanques, se tomaron muestras de cada uno de los sedimentadores en la parte superficial de los tanques, las muestras fueron

recolectadas en un recipiente plástico de 5 L. De igual manera, para la etapa de filtración, se realizó una toma de muestra en los dos canales de recolección para cada uno de los módulos. Finalmente, se empleó la misma técnica para la etapa de recolección de los tanques de almacenamiento, para el Módulo I se tomaron muestras del tanque 1 y 2, y para el Módulo 2, muestras de los tanques 3 y 4. Una vez recolectadas las muestras de la etapa de sedimentación, filtración y almacenamiento, se homogeneizaron y se tomaron alícuotas representativas de aproximadamente 50 mL, respectivamente, para su posterior análisis en el equipo de absorción atómica.

La elección de este muestreo se fundamentó en la necesidad de capturar de manera representativa la variabilidad de dicho proceso en su totalidad, considerando las múltiples unidades operativas, además por su simplicidad y efectividad.

2.6 Análisis de muestras

El análisis de manganeso y hierro fue realizado en el Laboratorio de Agua Potable de la planta Tixán ETAPA EP, mediante la técnica de Absorción Atómica. La lectura de las concentraciones, calibración del equipo, lo realizó personal calificado de ETAPA EP y se utilizó un espectrofotómetro de la marca Perkin Elmer (modelo PinAAcle 900T).

El patrón tanto de manganeso como de hierro tienen una concentración de 1 000 mg/L. A partir de esta solución madre se preparó una solución stock de 100 mg/L. A partir de la solución intermedia se tomaron las alícuotas para preparar la curva de calibración.

La curva de calibración de Mn se realizó a partir de las siguientes concentraciones: 10, 50, 100, 500 y 1 000 µg/L, preparadas en un volumen de 200 mL. Para el Fe se preparó la curva de calibración con las siguientes soluciones: 100, 250, 500, 1 000 y 2 000 µg/L. Del mismo modo cada solución se llevó a un volumen final de 200 mL. Los límites de cuantificación para Mn y Fe fueron 8 µg/L y 100 µg/L respectivamente. Estos valores fueron determinados mediante la validación del método.

Para el análisis de precisión, por cada lote de 10 muestras se analizó un duplicado en donde la diferencia relativa debe ser inferior o igual al 10% en Mn y menor o igual al 5% para Fe. Además, al final de cada lote se leyó una solución de control continuo de 100 µg/L para Mn y 500 µg/L para Fe y los valores obtenidos deben tener un porcentaje de recuperación del 90% - 110% para ambos casos (ETAPA EP, 2023).

2.7 Medición de la dosis suministrada de permanganato de potasio

Se tomaron 5 muestras del permanganato de potasio sólido directamente de la salida de la tolva, en un tiempo (T) de 45 segundos cada una, el cual es liberado al tanque de mezcla con agua que, posteriormente, mediante un sistema de bomba y tuberías, es suministrado al tanque de oxidación.

Las muestras se colocaron en crisoles pequeños, y tanto la masa de los crisoles (MC) como la cantidad de permanganato de potasio (MK) se midieron con una balanza de alta precisión.

Para el cálculo de la dosificación de permanganato de potasio disuelto en el agua se emplearon dos fórmulas, la ecuación 1 determinó únicamente el caudal másico de KMnO_4 sólido que ingresa al tanque de mezcla con agua en el tiempo establecido, es decir, en gramos por segundo. Mientras que, la ecuación 2 determinó la dosis suministrada en microgramos de reactivo oxidante por litro en agua cruda.

El caudal de agua cruda (Q) de ingreso al sistema de tratamiento se obtuvo directamente del software de control de la planta.

$$\text{Caudal másico de } \text{KMnO}_4 = \frac{MK - MC}{T} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{Dosis suministrada} = \frac{(\text{Dosis } \text{KMnO}_4)}{Q} * 1\,000\,000 \quad (\text{Ec. 2})$$

Las 5 muestras se tomaron para cada uno de los tratamientos, y el muestreo de permanganato de potasio sólido se realizó a la misma hora en la que se tomaron las muestras de agua cruda. Esta medición es indispensable para el posterior análisis de los datos.

2.8 Análisis de varianza de los datos de concentración de los metales

Para evaluar si los tratamientos propuestos tuvieron efecto sobre la remoción de manganeso y hierro, se empleó estadística inferencial, en donde los datos fueron analizados por la técnica ANOVA.

Los datos se registraron en una hoja de cálculo de Excel, posteriormente se exportaron al software R con interfaz R Studio (Versión 2023.12.1 Build 402.) para realizar los análisis.

Para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los 26 experimentos, se aplicó en cada caso el modelo ANOVA de una vía con un nivel de significancia del 5 %. La Ecuación 3 presenta el modelo usado por ANOVA donde y representa la concentración del

metal: Mn o Fe; μ , la media general; α_i , es el efecto de cada tratamiento i ; e , es el error de cada i tratamiento con una réplica j .

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij} \quad (\text{Ec. 3})$$

El análisis ANOVA reveló que existieron diferencias entre las medias de los tratamientos, confirmando la hipótesis alternativa. El estudio fue complementado con una prueba Post hoc con la corrección de Bonferroni para identificar los tratamientos que difirieron entre sí.

2.9 Consumo energético de los aireadores

Se seleccionaron los tratamientos que ofrecieron porcentajes de remoción significativos de hierro y manganeso con respecto al valor inicial. Posteriormente, se investigó el consumo energético de las unidades de aireación empleadas. Finalmente, se calculó el consumo energético total de cada tratamiento en base a la cantidad de unidades utilizadas para el total de horas que se mantienen encendidas.

2.10 Sesgos

Se evaluaron únicamente dos tratamientos por día, el primero por la mañana y el segundo por la tarde, esto debido a que cada operación del proceso requería un tiempo promedio de 45 minutos, obteniendo así un aproximado de 4 horas por tratamiento. Para el análisis se consideraron las condiciones variables como la concentración inicial de los metales en el agua cruda, asimismo otras condiciones secundarias como turbiedad por actividad pluvial y las operaciones de limpieza de sedimentadores y filtros. Estas consideraciones de estudio se debieron a que la experimentación se realizó en condiciones de operación reales y en días diferentes, generando sesgos que fueron considerados en el análisis de los datos obtenidos. Dicho esto, el análisis estadístico se hizo considerando el porcentaje de remoción, para cada uno de los metales, de tal manera que se normaliza el resultado con su respectiva concentración inicial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Dosis de permanganato de potasio suministrado

La Tabla 2 muestra el caudal de agua cruda que ingresa al tanque de oxidación, tomados directamente del software de control de la planta. También se muestra el promedio calculado de las cinco muestras de permanganato de potasio, obteniendo así, la dosis promedio para cada tratamiento. Los datos del reactivo corresponden a un tiempo de 45 segundos para cada una de las cinco muestras.

Se observó que el caudal de agua disminuyó considerablemente para el tratamiento 5, obteniendo un valor mínimo de ingreso de 881 L/s. Mientras que, para el tratamiento 12 se observó un valor máximo con un caudal de 1 300 L/s. Por otro lado, la dosis de reactivo para el tratamiento 2 es de 199.29 $\mu\text{g/L}$, lo cual fue un factor relevante ya que se estableció que la dosis óptima de permanganato de potasio para la oxidación de hierro y manganeso debe ser de 500 $\mu\text{g/L}$, por lo que, para el tratamiento mencionado la dosis suministrada fue tan solo el 39.85% de la dosis establecida lo que podría influir en el proceso de oxidación de metales dependiendo de la carga inicial de los mismos. Por otra parte, para el tratamiento 12 que tuvo el mayor caudal de agua cruda, resultando en una dosis de reactivo oxidante de 496.64 $\mu\text{g/L}$ siendo este a su vez, el más cercano a la dosis requerida.

En la tercera columna de la Tabla 2, se indica la relación de caudal de agua y dosis de reactivo para los 26 tratamientos, así como su promedio.

En base a la capacidad de ingreso de agua cruda de la planta de 1 050 L/s aproximadamente, y la dosis óptima de 500 $\mu\text{g/L}$, se estableció que la relación ideal debe ser igual o cercana a 2.1. Además, se observó que existe una relación máxima de 5.27 para el tratamiento 2 y una mínima de 1.54 para el tratamiento 26, siendo la relación máxima 3 veces mayor a la mínima. Esto quiere decir que, la dosificación de permanganato de potasio no fue repetitiva. Una vez establecida esta relación óptima, valores que la superen se consideran desfavorables ya que indican que existe una menor cantidad de permanganato de potasio suministrado en relación al caudal de agua cruda que se someterá al tratamiento de oxidación, por lo que la oxidación de hierro y manganeso estaría bajo condiciones de trabajo inferiores a las requeridas, lo que impide o dificulta que exista una buena remoción de estos metales en los procesos posteriores.

Tabla 2. Datos de la toma de muestras de KMnO_4 .

Tratamiento	Caudal de agua (L/s)	Dosis de KMnO_4 ($\mu\text{g/L}$)	Relación de agua/reactivo
1	1050	332.89	3.15
2	1050	199.29	5.27
3	1050	448.32	2.34
4	1050	253.23	4.15
5	881	359.19	2.45
6	998	373.80	2.67
7	1012	363.44	2.78
8	1220	334.96	3.64
9	1220	300.78	4.06
10	1086	385.39	2.82
11	1086	347.85	3.12
12	1300	496.64	2.62
13	1065	521.43	2.04
14	1120	342.76	3.27
15	1080	470.05	2.30
16	1080	491.36	2.20
17	1040	457.55	2.27
18	1020	504.93	2.02
19	1080	492.76	2.19
20	1070	525.51	2.04
21	1060	325.43	3.26
22	1040	537.57	1.93
23	1050	551.80	1.90
24	1085	369.88	2.93
25	1080	590.96	1.83
26	1055	684.70	1.54
Promedio	1074.15	425.48	2.52
Máximo	1300	684.70	5.27
Mínimo	881	199.29	1.54

3.2 Hierro

3.2.1 Análisis estadístico general por punto de muestreo

Los datos para este estudio se expresan en $\mu\text{g/L}$. Dado que son 26 tratamientos, 5 puntos de muestreo para cada uno junto con sus duplicados, se obtuvo un total de 260 datos para hierro.

El hierro al encontrarse en forma insoluble logra eliminarse por completo en la etapa de sedimentación, logrando así que sus concentraciones sean nulas. En las siguientes fases de filtración y almacenamiento las concentraciones se mantienen constantes esto indica que el proceso es eficiente y que no existe adición de hierro por contaminantes u otros factores.



En la Tabla 3, se expone la desviación estándar, mediana, valor mínimo y máximo para cada etapa. Cabe recalcar, que el análisis de la media se descartó debido a los sesgos, es decir, los valores extremos de concentración obtenidos en ciertos puntos que ocasionan variabilidad. Dicho esto, los valores de mediana para el punto C y M superan significativamente a las demás con valores de 166.5 y 180.1 respectivamente; mientras que, para AS, AF y TM los valores fueron cero (bajo los límites de detección), dando como resultado la remoción completa de este metal. Por otro lado, existieron valores atípicos como se observa en el punto M, en donde el valor máximo fue de 1 029 $\mu\text{g/L}$, que en promedio con su duplicado se obtiene 745.15 $\mu\text{g/L}$ (Tabla 3), dicho valor se aleja considerablemente del resto de concentraciones obtenidas para este punto, y, por ende, de su valor promedio. Este valor se registró en el tratamiento 5, en donde además se observó una excesiva turbiedad en el agua, la misma que fue ocasionada por las precipitaciones pluviales registradas en ese día de experimentación. Este fenómeno contribuye al arrastre de material terrestre hacia los cuerpos de agua, por lo que en consecuencia eleva la concentración del metal en la muestra.

Tabla 3. Resumen del análisis de concentraciones de hierro en $\mu\text{g/L}$ en las etapas de muestreo.

Código de punto de muestreo	Me	σ	Mínimo	Máximo
C	166.5	60.2	127.7	380.8
M	180.1	131.1	145.7	1029
AS	0	54.3	0	392.5
AF	0	1.1	0	7.3
TM	0	0	0	0

3.2.2 Diseño Experimental: Concentraciones y remociones de hierro por cada tratamiento empleado

La Tabla 4, expresa la media de las concentraciones para cada tratamiento de hierro de los duplicados y el porcentaje de remoción en cada punto de muestreo, a excepción de C y M, ya que sus porcentajes de remoción son nulos.

Al analizar las concentraciones obtenidas que comprenden a C se infiere que las mismas son elevadas, con un rango desde 127.7 $\mu\text{g/L}$ hasta 380.8 $\mu\text{g/L}$. De manera similar ocurre con M, que presenta un rango de 145.7 $\mu\text{g/L}$ a 1 029 $\mu\text{g/L}$, este aumento considerable en la concentración puede ser el resultado de errores humanos. Aunque, para los puntos de muestreo posteriores las concentraciones son prácticamente nulas, indicando que la remoción desde la etapa de sedimentación es efectiva.

Asimismo, se expresan los porcentajes de remoción promedio de los duplicados de cada punto de muestreo, los valores fueron obtenidos en base a las concentraciones iniciales de agua cruda para cada uno de los tratamientos, por lo que los porcentajes de remoción para el primer punto de muestreo son nulos, ya que la concentración es la misma. De manera similar ocurre en el segundo punto de muestreo de los módulos. Esto se debe a que en el transcurso de estos dos puntos no existe una remoción o eliminación de los metales, solo ocurre una oxidación. Por otra parte, para los puntos posteriores de agua sedimentada, filtrada y agua de los tanques de almacenamiento la remoción es igual al 100%, para la mayoría de los valores, demostrando que se logra eliminar el hierro en su totalidad y la vez se encuentra dentro de los parámetros de concentración establecidos por la OMS, brindando seguridad de consumo a los usuarios.

Tabla 4. Resultados de la concentración promedio de hierro ($\mu\text{g/L}$) y porcentaje de remoción (%).

Punto	C	M	AS		AF		TM	
Unidad de medida	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	%	$\mu\text{g/L}$	%	$\mu\text{g/L}$	%
1	167.9	179.55	0	100	0	100	0	100
2	173.8	185.25	0	100	0	100	0	100
3	189.55	210.7	0	100	0	100	0	100
4	182.4	187.15	0	100	0	100	0	100
5	354.9	745.15	196.25	50.0	3.64	98.9	0	100
6	200	220.9	3.796	98.10	0	100	0	100
7	187.2	195.8	5.265	97.16	0	100	0	100
8	173.6	178.15	0	100	0	100	0	100
9	378.5	379.45	4.9515	98.7	0	100	0	100
10	276.6	298.1	0	100	0	100	0	100
11	196.8	204.75	0	100	0	100	0	100
12	161.55	174.6	0	100	0	100	0	100
13	148.3	151.2	0	100	0	100	0	100
14	127.9	167.85	0	100	0	100	0	100
15	131.25	165.1	0	100	0	100	0	100
16	134.95	160.7	0	100	0	100	0	100
17	163.85	167.9	0	100	0	100	0	100
18	177.4	180.5	0	100	0	100	0	100
19	169.5	194.45	4.819	97.1	0	100	0	100
20	165.05	178.75	0	100	0	100	0	100
21	158.95	159.05	0	100	0	100	0	100
22	161.75	179.85	0	100	0	100	0	100
23	161.75	164.6	0	100	0	100	0	100
24	156.15	158.5	0	100	0	100	0	100
25	156.35	170	0	100	0	100	0	100
26	143.15	158	0	100	0	100	0	100
Promedio	184.6	211.1	8.27	97.73	0.1	99.9	0	100

3.2.3 Análisis estadístico de valores de concentración y remoción de hierro

A través de estadística inferencial se compararon las medias entre tratamientos para los diferentes puntos. El resumen del análisis ANOVA se ilustra en la Tabla 5 para determinar si existen diferencias de concentración de hierro por tratamiento en cada punto. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los puntos C y entre los puntos M, es decir, en el agua cruda y el agua distribuida a los módulos. Estas diferencias significativas de concentración de agua cruda se deben a las variaciones por la naturaleza, siendo independientes a los tratamientos y además la etapa donde se introduce aire favorece la oxidación de los metales, lo que resulta en una mayor concentración de hierro en forma de partículas sólidas suspendidas, ya que los productos de la oxidación aún no han sido eliminados del agua.

Por el contrario, en los puntos de muestreo del agua sedimentada y el agua filtrada no existen diferencias estadísticamente significativas debido a que la mayoría de los valores comprendidos en estos puntos son relativamente iguales pues se logran valores de remoción similares independientemente del tratamiento. Finalmente, para el punto de tanques de almacenamiento todas las concentraciones fueron menores al límite de detección del equipo por lo tanto se puede aproximar que el proceso de remoción tuvo una efectividad del 100% y no se encontraron diferencias entre tratamientos.

Tabla 5. ANOVA para determinar diferencias de remoción de hierro por tratamiento en cada punto de muestreo.

Código de punto de muestreo	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	P
C	25	184995	799.6	2E-16
M	25	711877	4.465	0.000156
AS	25	73649	0.992	0.507
AF	25	1.022	1	0.499
TM	-	-	-	-

Para asegurar la validez de los resultados en el análisis estadístico, es fundamental la verificación de los supuestos. Para ello, se evaluó la normalidad y homocedasticidad para los dos metales de estudio (Anexo B), ya que son supuestos fundamentales para el uso del ANOVA. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de homocedasticidad y normalidad, lo que garantiza la validez de los resultados obtenidos en el análisis.

3.3 Manganeso

3.3.1 Análisis general por punto de muestreo

La toma de muestras fue la misma para los dos metales, por lo que se obtuvieron 260 datos, además los puntos de muestreo fueron codificados de igual manera.

En el análisis realizado para evaluar las concentraciones de manganeso expuesto en la Figura 9, se observan variaciones en el punto “M1” y “M2”, correspondientes a las muestras de agua que salen del tanque de oxidación de agua cruda e ingresan a los módulos, destacándose por sus concentraciones significativamente más altas que los demás puntos de muestreo, con una mediana de 129.6 $\mu\text{g/L}$. Los resultados en estos puntos sugieren la existencia de factores contribuyentes para la elevada presencia de este metal. Esto puede atribuirse al permanganato de potasio, que, como se mencionó en la descripción del proceso de oxidación de la planta, la dosificación se realiza antes de que suceda la aireación. Según Valentini et al. (2022), el permanganato de potasio oxida el manganeso presente en el agua, transformándolo de su forma soluble (Mn^{+2}) a insoluble (MnO_2), para que así su remoción sea más efectiva y fácil. El punto de muestreo, al estar situado inmediatamente después de la etapa de oxidación, explica por qué las concentraciones de manganeso son más altas. Además, este suceso indica que, aunque el proceso de oxidación de manganeso se ha llevado a cabo, la eliminación de los productos insolubles resultantes no ha sido completamente efectiva.

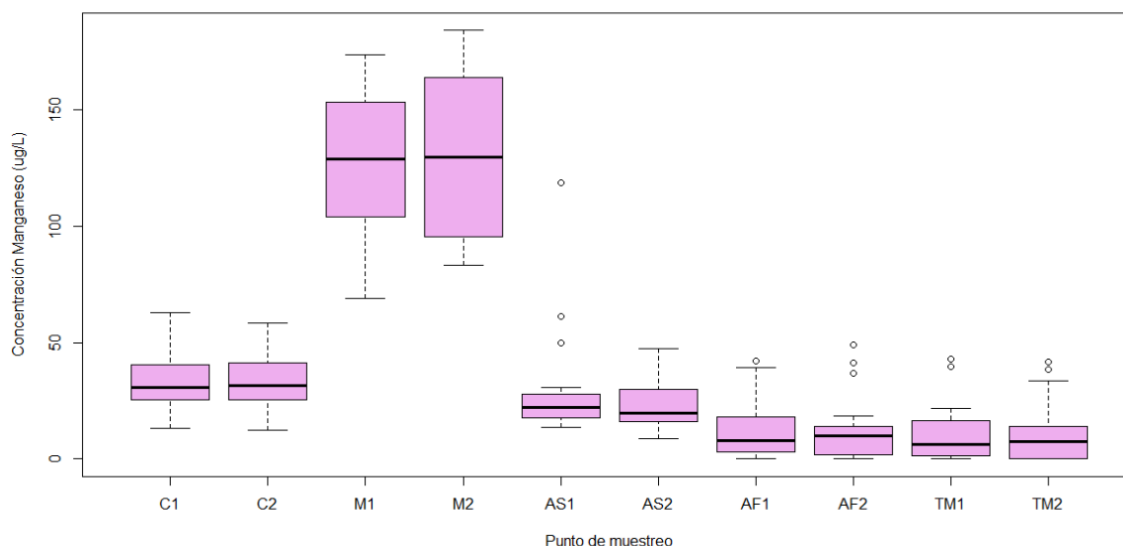


Figura 9. Diagrama de cajas de las concentraciones de manganeso en cada punto de muestreo.

En la Tabla 6 se presenta el resumen del análisis de concentraciones, en donde consta la desviación estándar, mediana, valor mínimo y máximo para cada punto de muestreo.

Los valores de la mediana para los últimos 3 puntos de muestreo indican la presencia de manganeso, en donde el valor máximo de la concentración se evidencia en el punto M, es decir, el agua del ingreso a los módulos después de la oxidación con un valor de 184.3 $\mu\text{g/L}$. Sin embargo, se observa que para los puntos posteriores existe una disminución del valor de la mediana, lo que sugiere que se está logrando la remoción de las concentraciones y aunque las concentraciones para el punto final TM no son nulas, los valores se encuentran por debajo del límite permitido por la OMS de 2 mg/L por lo que el agua cumple con los requerimientos de consumo para la distribución.

Tabla 6. Resumen del análisis de concentraciones de manganeso en $\mu\text{g/L}$ para todas las etapas de muestreo.

Código de punto de muestreo	Me	σ	Mínimo	Máximo
C	31.6	11.5	12.3	62.8
M	129.6	31.1	69.2	184.3
AS	21.3	16.6	8.7	118.9
AF	9.8	12.4	0	49.2
TM	7.1	11.7	0	42.9

3.3.2 Diseño Experimental: Concentraciones y remociones de manganeso por cada tratamiento empleado

Las concentraciones de manganeso difieren, como se visualiza en la Tabla 7, la cual presenta las concentraciones promedio de los duplicados de cada punto de muestreo para cada tratamiento desarrollado. Las concentraciones en el agua cruda varían entre 12.65 y 60.57 $\mu\text{g/L}$. Estos valores evidencian la calidad inicial del agua, que varían a causa de condiciones ambientales en el momento del muestreo. Después del proceso de oxidación, las concentraciones son elevadas, oscilan entre 46.76 y 179 $\mu\text{g/L}$. En la sedimentación varían de 11.49 a 82.41 $\mu\text{g/L}$, la cual es efectiva en la reducción de la carga de sólidos suspendidos y algunos contaminantes asociados.

Las concentraciones se reducen aún más en la etapa de filtración, variando entre 0.64 y 4.21 $\mu\text{g/L}$. Finalmente, en el punto de muestreo al final del tratamiento, en donde el agua se encuentra en tanques de almacenamiento "TM", muestra los valores más bajos de concentración, indicando que el proceso de tratamiento en su totalidad ha sido exitoso en la

disminución de los metales de interés. La concentración del manganeso va decreciendo a lo largo del proceso.

Tabla 7. Resultados de la concentración promedio de manganeso ($\mu\text{g/L}$) y porcentaje de remoción (%).

Punto	C	M	AS	AF	TM
Unidad de medida	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	%	%
1	29.77	127.25	11.49	61.4	0.0
2	42.52	159.8	20.15	52.6	4.13
3	45.19	138.45	17.75	60.6	2.39
4	48.93	179	29.12	40.4	1.61
5	60.57	114.06	82.41	10.4	41.81
6	34.32	79.51	54.45	0.0	44.21
7	28.33	121.15	31.69	0.9	16.08
8	35.57	92.16	30.04	15.5	19.45
9	56.72	168.7	38.29	31.7	21.58
10	42.45	167.4	27.97	34.0	14.48
11	39.93	166.15	30.35	24.0	6.50
12	16.99	91.22	16.97	9.2	6.27
13	22.15	99.32	21.37	7.8	14.58
14	12.68	122.6	19.30	0.0	11.24
15	22.97	127.2	16.98	26.3	15.48
16	20.69	99.83	18.51	10.8	13.29
17	34.87	143.5	26.05	25.3	10.87
18	42.62	130.5	29.78	29.8	20.04
19	30.84	159.4	24.42	21.5	3.31
20	37.37	175.3	22.63	39.4	36.25
21	26.83	137	21.13	21.5	0.64
22	25.69	46.76	18.82	26.7	1.24
23	24.99	156.05	14.31	42.7	0.56
24	26.74	129.3	14.93	43.6	5.97
25	31.01	107	16.51	46.8	2.84
26	30.24	91.1	15.36	49.0	4.86
Promedio	33.50	129.31	25.80	28.1	12.31

Se realizó el mismo cálculo y análisis para el manganeso. El análisis de los porcentajes de remoción para los dos primeros puntos de muestreo es el mismo, en el desarrollo de las operaciones entre los dos puntos no ocurre una eliminación como tal por lo que la remoción de manganeso en estos dos puntos es nula. A diferencia del hierro, para los demás puntos no existe una remoción total y variable para cada uno de los tratamientos. En el caso del agua sedimentada, el porcentaje de remoción más alto se obtiene para el tratamiento 1 con un valor

de 61.4% y una remoción nula en el tratamiento 6. El porcentaje promedio para todos los tratamientos en este punto es de 28.1%, considerándose un valor bajo, esto puede ser debido a que en esta etapa aún pueden encontrarse partículas suspendidas en el agua. Para el punto de muestreo de agua filtrada los valores de remoción aumentan considerablemente, obteniéndose un promedio total para todos los tratamientos de 63.3%, demostrando que aquí las partículas que se encontraban en la sedimentación se remueven de una manera eficiente. De igual manera, el porcentaje de remoción más alto en esta etapa fue en el tratamiento 1 con una remoción del 100% y la más baja en el tratamiento 6, con un 0% de manganeso removido. Finalmente, para el agua de los tanques de almacenamiento el porcentaje de remoción total es de 68.5%, aunque en esta etapa ya no existe un proceso de remoción esta diferencia puede deberse a la variabilidad existente en la toma de muestras, sin embargo, es un porcentaje de remoción favorable.

3.3.3 Análisis estadístico de valores de concentración y remoción de manganeso

El análisis ANOVA del manganeso se presenta en la Tabla 8 en donde se observa que, a diferencia del hierro, se presentaron diferencias significativas entre todos los puntos de muestreo. Estas variaciones se deben a que en ninguna de las etapas de muestreo se logró remover en su totalidad este metal; sin embargo, las concentraciones obtenidas se encuentran muy por debajo de los límites aceptables según la OMS (2018). El principal factor por el cual este metal no posee una remoción completa en comparación con el hierro es debido a que las concentraciones de manganeso en los primeros dos puntos de muestreo son mayores, por la adición del reactivo oxidante (KMNO_4), al inicio del proceso. Además, otro factor relevante es la variabilidad en la calidad del agua bruta entrante. Las fluctuaciones en las concentraciones iniciales de manganeso y la presencia de materia orgánica pueden afectar la eficiencia de los procesos de coagulación y filtración, dificultando la remoción completa de este metal.

Por otro lado, específicamente para el manganeso, se realizó un análisis ANOVA adicional con respecto a los porcentajes de remoción por punto (Anexo C), lo que no ocurrió con el hierro debido a que solo se presentaron porcentajes de remoción nulos (0%) en las dos primeras etapas y remociones totales (100%) en las etapas posteriores, lo que impidió que se pueda realizar un análisis estadístico por escasez de variabilidad en los datos del hierro.

Sin embargo, los resultados del análisis del manganeso indicaron que evidentemente se presentaron diferencias significativas, es decir, que tomando en cuenta la concentración ($\mu\text{g/L}$) y los porcentajes de remoción (%) los resultados fueron semejantes.

Tabla 8. ANOVA para determinar diferencias de remoción de manganeso por tratamiento en cada punto de muestreo.

Código de punto de muestreo	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	P
C	25	-	-	-
M	25	49.84	27.46	0.00229
AS	25	40.54	3.35	0.02561
AF	25	48.46	37.64	0.00327
TM	25	47.54	30.32	0.00422

En base a los datos de porcentaje de remoción de la Tabla 7, se realizó un análisis post hoc con corrección de Bonferroni para identificar las diferencias significativas entre cada tratamiento. Se descartaron de este último análisis a los puntos C y M puesto que aquí no existe remoción. En el punto AS se estableció que existen diferencias significativas. Por otro lado, los tratamientos que presentan más diferencias entre sí en los puntos AF y TM, corresponden a los tratamientos 6, 14 y 20, los cuales difieren con la mayoría de los tratamientos restantes, pero no entre ellos. En la Tabla 7, se denota una remoción nula para estos 3 tratamientos, debido a que la concentración final es mayor a la inicial. El análisis post hoc con corrección de Bonferroni indicó que estos tratamientos resaltan ante los demás bajo una connotación negativa, puesto que ofrecieron los peores resultados en comparación a los tratamientos restantes en los cuales no existe una contribución significativa; y dado que no se observan mejoras con la utilización de aireadores, emplear los mismos bajo ese contexto es innecesario. Por lo tanto, eliminarlos podría simplificar la operación y reducir costos sin afectar la eficiencia del tratamiento.

3.4 Selección de la configuración de aireadores óptima

Las mejores remociones de hierro y manganeso, llegando a un 100%, se obtuvieron con los tratamientos 1, 21 y 23. Debido a la escasez de estudios similares, la selección de tratamiento óptimo se basa únicamente en los resultados alcanzados de este estudio. No obstante, dada la variabilidad en las concentraciones de hierro y manganeso entre cada punto de muestreo para cada uno de los 26 tratamientos se determinó que las diferencias significativas que se presentan entre ellos se deben únicamente a la influencia de factores externos, mas no al efecto causado por el rendimiento eficaz de alguno de los tratamientos. Por ende, el análisis ANOVA y Post hoc indicaron que no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos que potenciaron la remoción de hierro y manganeso durante el proceso de oxidación.

Rodríguez (2023) aclara que, si la concentración de hierro y manganeso en el agua cruda es ≤ 8 mg/L de Fe y ≤ 5 mg/L de Mn, se considera el uso de aireadores, con una altura entre 1.2 a 3 m y entre 3 a 9 aireadores. Las concentraciones de hierro y manganeso del agua cruda

utilizada por la planta de Tixán sí cumplen con los rangos establecidos por lo que el uso de aireadores sería viable. Sin embargo, las concentraciones iniciales del agua cruda ya se encuentran por debajo de los límites establecidos por la OMS, por lo que no se consideró necesaria su implementación en el tanque de oxidación y se considera que únicamente con el suministro de permanganato de potasio ya se obtienen resultados favorables.

La ineficacia del tratamiento de oxidación por aireación puede deberse a varios factores, tales como la variabilidad de las concentraciones del agua cruda por factores climáticos (precipitaciones pluviales), etc. Asimismo, otro factor relevante que se podría considerar es el pH del agua cruda, proveniente del río Machángara, el cual es cercano a la neutralidad. Barrera (2017), indica que para el uso de los aireadores se requiere un pH cercano a 9.5, y no se considera favorable alterar esta propiedad para el caudal de agua cruda.

Además, en el tanque de oxidación no existe remoción de estos metales, únicamente beneficia la formación de dióxido de manganeso e hidróxido de hierro, los mismos que son insolubles en el agua. Los métodos de oxidación se contemplan debido a que se ha observado que estos metales se depositan en las tuberías a largo plazo. Estos depósitos pueden reducir la presión del agua dentro de la tubería por lo que, si se detiene el flujo, por cuestiones de mantenimiento, al momento de continuar con el flujo los depósitos serían arrancados bruscamente de las tuberías lo que consecuentemente trae consigo efectos adversos sobre las propiedades organolépticas del agua como olor, color y sabor desagradables (OMS, 2018).

3.5 Consumo energético de los tratamientos

El consumo energético de cada uno de los aireadores correspondió a 90 KW/h según se especifica en la placa de identificación del equipo (Anexo D). Por lo tanto, el tratamiento 1 al no utilizar aireadores no presentó un consumo energético, el tratamiento 21 (par 1, 3 y 5 encendidos) y 23 (par 2, 3 y 5 encendidos) utilizaron 3 pares, es decir, 6 aireadores simultáneamente y presentaron un consumo de 540 KW/h.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

En este estudio, la implementación del diseño experimental basado en la disposición variada de los distintos pares de aireadores permitió identificar que, aunque algunos tratamientos lograron una remoción efectiva de hierro y manganeso, la incorporación de aireadores no mejoró de manera influyente la eficiencia en comparación con el uso exclusivo de permanganato de potasio. Por lo tanto, se concluye que la optimización del proceso se puede lograr mediante una dosificación constante adecuada de permanganato de potasio, prescindiendo del uso de aireadores.

Los resultados mostraron que los tratamientos con aireadores no presentaron diferencias significativas en la remoción de los metales en comparación con el tratamiento sin aireación, lo que sugiere que la oxidación por aireación, bajo las condiciones evaluadas, no incrementó la eficiencia del proceso. En este contexto, se seleccionó el tratamiento 1, que no utiliza aireadores y emplea únicamente el permanganato de potasio como agente oxidante, ya que demostró los mejores porcentajes de remoción para hierro y manganeso, confirmando así que el sistema de aireación no es necesario para optimizar la remoción de estos metales.

El uso de aireadores incrementa considerablemente el consumo energético sin aportar una mejora notable en la remoción de los metales. Además, dado que los niveles iniciales de manganeso y hierro cumplen con los estándares de seguridad establecidos por la OMS, y los resultados del análisis estadístico respaldan esta conclusión, la estrategia más efectiva es centrar el tratamiento en el ajuste preciso de la dosis de permanganato de potasio, optimizando así los recursos, reduciendo el consumo energético y garantizando la calidad del agua tratada sin necesidad de un proceso adicional de aireación.

4.2 Recomendaciones

- El suministro de KMnO_4 directo desde la tolva del equipo dosificador del permanganato de potasio podría mejorarse, pues presenta un problema de apelmazamiento el cual se debe solucionar manualmente para que su dosificación pueda ser uniforme.
- Se recomienda no usar el sistema de aireadores ya que es innecesario y energéticamente demandante.
- Realizar pruebas de oxidación de hierro y manganeso a escala laboratorio únicamente bajo el efecto de la aireación sin el suministro de permanganato de potasio, añadiendo variables como ajuste de pH y variación de la dosis de permanganato con el fin de observar si la aireación presenta un efecto rentable.
- Se recomienda realizar este estudio, así como su análisis de funcionalidad antes de implementar el proceso e infraestructura en la planta.

Referencias

1. Abad, D., & Guaraca, J. (2022). *Evaluación técnica del proceso de filtración rápida y cloración en la Planta de Tratamiento de Agua Tixán*. [Universidad de Cuenca].
2. Abdel Ghany, U. A., & Mahmoud, A. A. (2019). Comparison between different types of Chemical Coagulants used in Water Purification. *Engineering Research Journal - Faculty of Engineering (Shoubra)*, 41(1), 89-93. <https://doi.org/10.21608/erjsh.2019.288241>
3. Amat, J. (2016). *ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias*. https://cienciadedatos.net/documentos/19_anova
4. Banco Mundial. (2020). Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas. World Bank. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>
5. Barrera, D. (2017). *Remoción de manganeso en la planta de tratamiento de agua potable de tocancipá – cundinamarca* [Escuela Colombiana de Ingeniería]. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/744/Barrera%20Mart%EDnez%20,%20Diana%20Isolina%20-202017.pdf;jsessionid=60822DDC8BC35DDC1388429468F64F82?sequence=1>
6. 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>
7. Brostow, W., Lobland, H. E. H., Pal, S., & Singh, R. (2009). *Polymeric flocculants for wastewater and industrial effluent treatment*.
8. Burbano, L. M. M. (2011). Remoción de hierro y manganeso por oxidación con cloro y filtración en grava. Universidad del Valle.
9. Burbano, L., & Sanchez, L., D. (2018). *Remoción de hierro y manganeso por oxidación—Filtración para agua potable* (p. 16). Instituto Cinara, Universidad del Valle.
10. Cárdenas, L., Castañeda & A. Romero, J. (2014). Remoción de hierro en agua con alta concentración. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
11. Chaturvedi, S., & Dave, P. N. (2012). Removal of iron for safe drinking water. *Desalination*, 303, 1-11.

12. Chávez, V., & Alberto, J. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 35(2), 304-308. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>
13. CONAGUA. (2014). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/sgapds-1-15-libro4.pdf>
14. Dagnino, J. (2014). Análisis de varianza. *Chil Anest*, 43, 306-310.
15. Edzwald J. K., Dempsey, B. A., Amirtharajah, A., Dentel, S & Lawler, D., Letterman, R. (1989). Committee Report -- Coagulation as an Integrated Water Treatment Process (PDF). *Journal American Water Works Association*, 81, 72-78.
16. El Mercurio. (2023). Manejo sostenible del agua en Cuenca. *El Mercurio*.
17. ENCA. (2016). *Estrategia Nacional de Calidad de Agua*.
18. Espinoza, J. (2023). Manual de Operación y Mantenimiento. Cuenca, Ecuador. ETAPA EP.
19. Ghernaout, D. (2020). Water Treatment Coagulation: Dares and Trends. *OALib*, 07(08), 1-18. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106636>
20. Guillen, J., Jaramillo, A., Baquerizo, R., & Córdova, R. (2021). Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas: Una revisión. 6(9), 1384-1407. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i9.3118>
21. Hamdon, R., Essa, T., Selouma, T., & ElZahar, M. (2024). Comparison Between Different Types of Organic And Inorganic Coagulants Used in Water Purification. *Fayoum University Journal of Engineering*, 7(2), 31-37. <https://doi.org/10.21608/fuje.2024.343761>
22. Kohl, P. M., & Medlar, S. J. (2006). Presencia de manganeso en el agua potable y control del manganeso. Asociación Americana de Obras Hidráulicas.
23. Kondakis, X. G., Makris, N., Leotsinidis, M., Prinou, M., & Papapetropoulos, T. (2010). Possible health effects of high manganese concentration in drinking water. *Archives of Environmental Health*, 44(3), 175-178. <https://doi.org/10.1080/00039896.1989.9935883>

24. Kouzour, S., El Azher, N., Gourich, B., Gros, F., Vial, C., & Stiriba, Y. (2017). Removal of manganese (II) from drinking water by aeration process using an airlift reactor. *Journal of Water Process Engineering*, 16, 233-239. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.01.010>
25. Landa, R., Neri, C., & Magaña, V. (2008). *Agua y clima: Elementos para la adaptación al cambio climático*. Semarnat. <https://desarrollo.cloud.gt/funcagua/wp-content/uploads/2020/04/2018.-Agua-y-Clima-Elementos-para-la-adptaci%C3%B3n-al-cambio-clim%C3%A1tico.-SEMARNAT.pdf>
26. LeChevallier, M. W. (2013). Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking-water. *Water Intelligence Online*, 12. <https://doi.org/10.2166/9781780405858>
27. Lee, S., & Lee, D. K. (2018). What is the proper way to apply the multiple comparison test?. *Korean journal of anesthesiology*, 71(5), 353–360. <https://doi.org/10.4097/kja.d.18.00242>
28. López, E. (2016). Aireación eficiente segura y económica del agua en Colombia y en el mundo [Universidad de Pamplona]. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/1362/1/Lopez_2016_TG.pdf
29. Maier, R., Gerba, C., & Pepper, I. (2009). *Environmental microbiology* (2.a ed.). Elsevier/Academic Press.
30. Marsidi, N., Abu Hasan, H., & Sheikh Abdullah, S. R. (2018). A review of biological aerated filters for iron and manganese ions removal in water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 23, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.010>
31. Mazunina, D. L., & Leonidovna, M. D. (2015). Manganese Negative Effects In Body Chronic Intake With Drinking Water. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*, 22(3), Article 3. <https://doi.org/10.17816/humeco17093>
32. McFarland, M. L., & Dozier, M. C. (2004). Problemas del agua potable: El hierro y el manganeso. Cooperative de Texas Extensión, El Sistema Universitario Texas A & M.
33. Medialdea, J., Arnáiz, C., & Díaz, E. (2005). Permanganato potásico: Un potente y versátil oxidante. 25(1), 129-136.

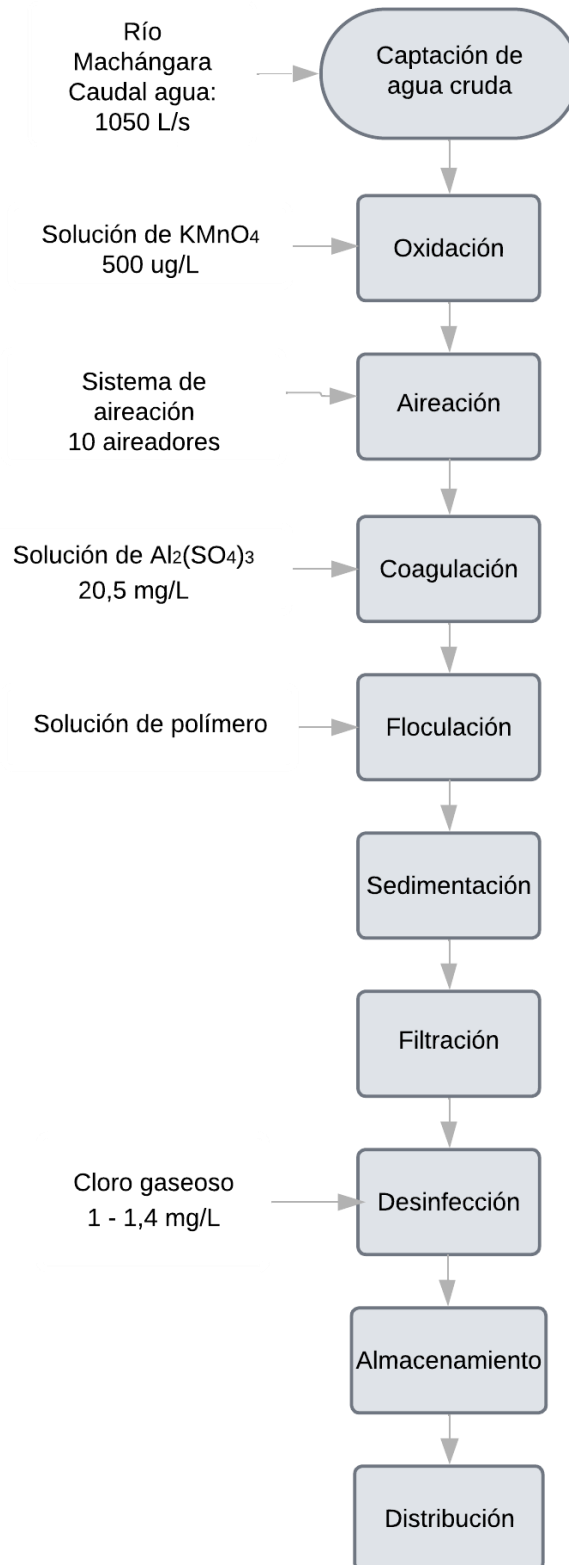
34. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA). Acuerdo Ministerial No. 097-A. Registro Oficial Edición Especial No. 316 de 04-may-2015.
35. Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (2.^a ed.). Limusa.
36. Negrón Martínez, S. (2014). El Hierro y el Manganeso en el Agua [Unpublished manuscript]. Graduate School, Polytechnic University of Puerto Rico.
37. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169. (2013). Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras. Instituto Ecuatoriano de Normalización. Quito.
38. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108. (2014). Agua Potable Requisitos. Instituto Ecuatoriano de Normalización. Quito.
39. Norma Técnica Ecuatoriana: INEN 1108. (2006). Agua Potable: Requisitos. Quito
40. Ocampo-Rodríguez, D. B., Vázquez-Rodríguez, G. A., Martínez-Hernández, S., Iturbe-Acosta, U., & Coronel - Olivares, C. (2022). Desinfección del agua: Una revisión a los tratamientos convencionales y avanzados con cloro y ácido peracético. *Ingeniería del Agua*, 26(3), 185-204. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17651>
41. Orellana, J. A. (2005). Tratamiento de las Aguas. UTN - FRRO. https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf
42. OPS. (2005). *Guía para el mejoramiento de la calidad del agua* (p. 59). Organización Panamericana de la Salud.
43. Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
44. Organización Mundial de la Salud. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano. <https://iris.who.int/handle/10665/272403>
45. Organización Mundial de la Salud. (2023). Hierro en el agua y efectos en la salud. Carbotecnia. <https://www.carbotecnia.info/learning-center/water-chemistry/iron/?lang=en>

46. Palavecino, P. (2009). *Diseño de ampliación y optimización de planta potabilizadora de agua para la empresa DSD Construcciones y Montajes S.A.* Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
47. Parker, L.V. (1994). The Effects of Ground Water Sampling Devices on Water Quality: A Literature Review. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 14, 130-141.
48. Patil, G. (2011). Composite sampling: A novel method to accomplish observational economy in environmental studies: A monograph introduction., 18(2), 385–392. doi:10.1007/s10651-011-0174-z
49. Petruskevski, B. (2003). Groundwater Resources & Treatment. Pág. 5 – 20.
50. Phatai, P., Wittayakun, J., Chen, W.-H., Futalan, C. M., Grisdanurak, N., & Kan, C.-C. (2014). Removal of manganese (II) and iron (II) from synthetic groundwater using potassium permanganate. *Desalination and Water Treatment*, 52(31-33), 5942-5951. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.819150>
51. Ramirez, F. (2015). *Tratamiento de Desinfección del Agua Potable*. Canal Educa.
52. Ramsey, C.A. (2015). Considerations in sampling of water. *Journal of AOAC International*, 98 2, 316-20.
53. Ras. (2000). Ministerio de desarrollo económico, dirección de agua potable y saneamiento básico, Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, sección II título E, tratamiento de aguas residuales.
54. Raveendran, R., Chatelier, B., & Williams, K. (2002). Oxidation of manganese in drinking water systems using potassium permanganate. *Water Supply*, 2(5-6), 173-178. <https://doi.org/10.2166/ws.2002.0166>
55. Rezzano, N., Díaz, J. L., Bianchi, F., Dupuy, G., González, E., Larrea, D. & Carrasco, Q. G. (2008). Remoción de manganeso en agua potable.
56. Rizzo, A., Romina, D., Arcagni, M., Perez Catán, S., Bubach, D., Sánchez, R., Ribeiro Guevara, S., & Arribére, M. A. (2010). Concentraciones de metales pesados en distintos compartimentos de lagos andinos de Patagonia Norte. *Ecología austral*, 20(2), 155-171.
57. Rodriguez, J. P. (2023). *Potabilización de agua* (1.^a ed.). Alpha.

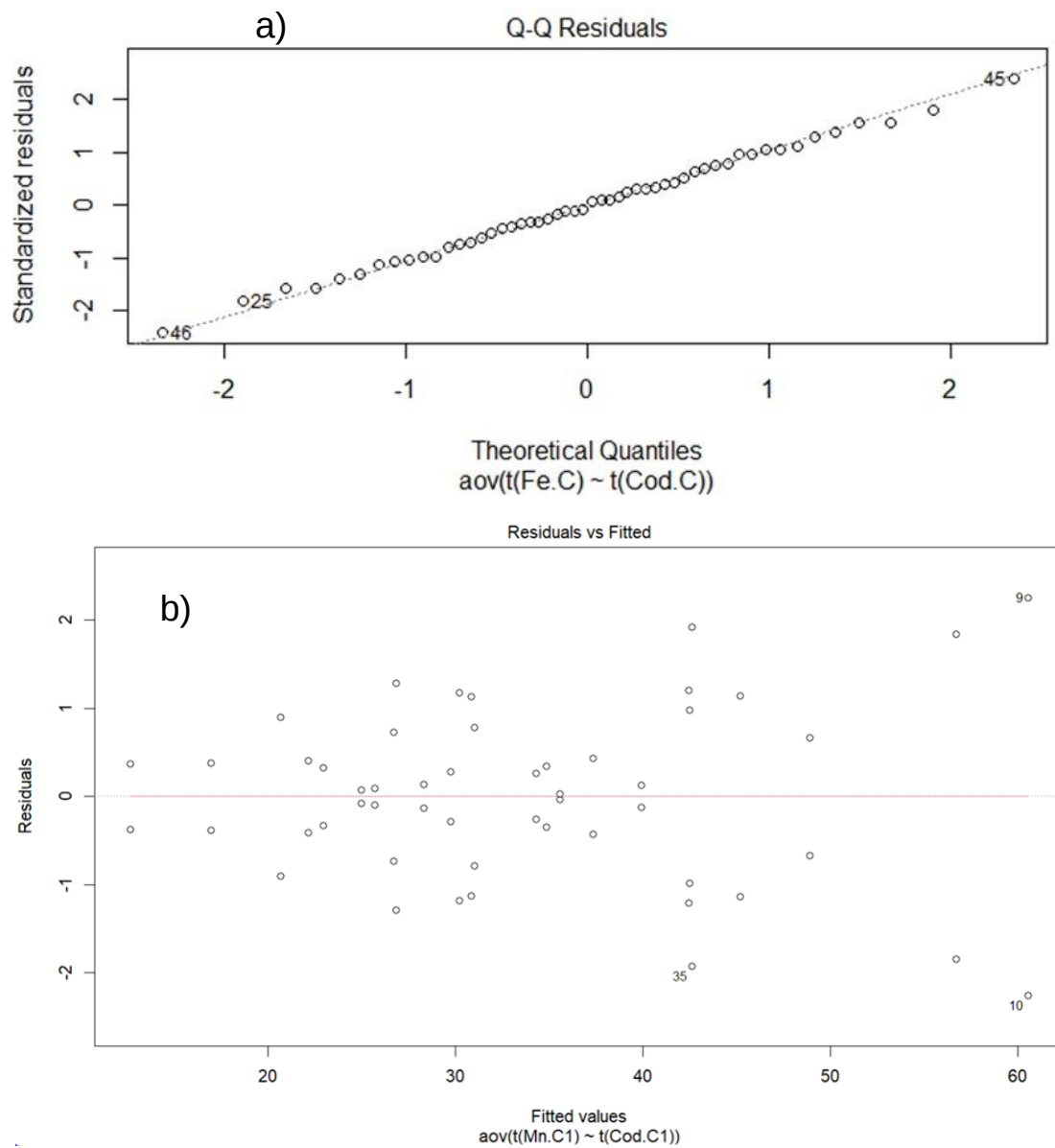
58. Ruiz, A. (2009). *Herramientas estadísticas-comparación de más de dos muestras: ANOVA (Parte I)*. Universidad Pontificia COMILLAS.
59. Sanchez, C. (2020). *Estudio de la remoción de manganeso y hierro en el módulo II de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tixán* [Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10224/1/15854.pdf>
60. Sun, Y. (2021). New Class of Flocculants and Coagulants. *Materials Research Foundations*.
61. Sutherland, K. (2009). Filtration and separation technology: What's new in sedimentation?., 46(1), 34–36. doi:10.1016/s0015-1882(09)70091-6
62. Tarhan, G. (2019). *Which Disinfection Method is Effective for Water Disinfection*. 2(4). <https://doi.org/10.31031/CJMI.2019.02.000544>
63. Toxqui, L., Piero, A. D., Courtois, V., Bastida, S., Sánchez-Muniz, F. J., & Vaquero, M. a P. (2010). Deficiencia y sobrecarga de hierro: Implicaciones en el estado oxidativo y la salud cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria*, 25(3), 350-365.
64. Valencia, C. (2011). *Química del hierro y manganeso en el agua, métodos de remoción* (Bachelor's thesis). Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/754>
65. Valentini, M. H., dos Santos, G. B., Sanchez Franz, H., Aldrighi da Silva, L., da Silva Fraga, G., Peterson de Mello, N., dos Santos Boeira, L., & Flores Romani, R. (2022). Analysis of the Influence of Climatic Factors on the Concentration of Iron and Manganese in Raw Water Intended for a Water Treatment System. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(05), 14.
66. Weber, W. J. (2021). Control de la calidad del agua: Procesos fisicoquímicos. Reverte.

Anexos

Anexo A. Diagrama de flujo operacional de la planta de tratamiento de agua Tixán.



Anexo B. (a) Distribución de la normalidad de las concentraciones de hierro y manganeso en el agua cruda. (b). Homocedasticidad para las concentraciones de hierro y manganeso en el agua cruda.



Anexo C. ANOVA para determinar diferencias de concentración de manganeso por tratamiento en cada punto de muestreo.

Código de punto de muestreo	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	p	Significativo (p<0,05)
C	25	590994	105,6	2E-16	Sí
M	25	1799	27,46	4,95E-13	Sí
AS	25	10774	3,35	0,00158	Sí
AF	25	7705	37,64	1,04E-14	Sí
TM	25	6813	30,32	1,49E-13	Sí

Anexo D. Placa de identificación de los aireadores.

