

REMOCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE FERRATO DE POTASIO SINTETIZADO

REMOVAL OF ORGANIC MATTER FROM TEXTILE INDUSTRY WASTEWATER BY SYNTHESIZED POTASSIUM FERRATE

Ramiro Escalera, Uli Nicol Hosse Pastor, Sara Castillo

Centro de Investigaciones en Procesos Industriales (CIPI)

Universidad Privada Boliviana

rescalera@upb.edu

(Recibido el 16 de junio 2022, aceptado para publicación el 15 de julio 2022)

RESUMEN

Se investigó el uso de ferrato de potasio sintetizado como opción de tratamiento para la remoción de la materia orgánica (DQO) y del color contenidos en aguas residuales de una planta teñidora y lavadora de telas. Los tintes orgánicos industriales usados en el proceso son: Reactive blue 19, Allura red y Reactive black 5. Como resultado de un diseño experimental a temperatura ambiente, se encontró una dosis óptima de ion ferrato de aproximadamente 90 mg-FeO₄²⁻/l a un pH = 7, condiciones que generaron una eficiencia de remoción de DQO disuelto de 82%. La eficiencia de remoción de color fue mayor al 80% a pH = 7 y una dosis de ion ferrato de 120 mg/l. El proceso de coagulación-floculación tarda 21 min *i.e.* 1 min de agitación rápida y 20 min de agitación lenta y controlada a una velocidad de corte de 33 s⁻¹. La velocidad de sedimentación crítica de los flóculos formados fue de 3,5 cm/min en las condiciones óptimas. Con esta velocidad se puede diseñar sedimentadores de una carga superficial de 50,4 m³/m²/d que es superior a los valores usados comúnmente en el diseño de sedimentadores en las plantas de clarificación de aguas destinadas al consumo humano. En conclusión, el estudio demuestra que el uso del ferrato de potasio como coagulante y oxidante, es efectivo para la remoción de la materia orgánica y la decoloración de aguas residuales provenientes de la industria textil.

Palabras Clave: Ferrato de Potasio, Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil, Remoción de DQO, Decoloración, Velocidad de Sedimentación.

ABSTRACT

This study investigated the use of synthesized potassium ferrate as a treatment option for the removal of organic matter (COD) and color contained in wastewater from a fabric dyeing and washing plant. The industrial organic dyes used in the process are: Reactive blue 19, Allura red and Reactive black 5. As a result of an experimental design at room temperature, an optimal dose of ferrate ion of approximately 90 mg-FeO₄²⁻/l was found at a pH = 7, conditions that generated a removal efficiency of soluble COD of 82%. The color removal efficiency was greater than 80% at pH = 7 and a ferrate ion dose of 120 mg/l. The coagulation-flocculation process takes 21 min; *i.e.* 1 min of rapid agitation and 20 min of slow and controlled agitation at a shear rate of 33 s⁻¹. The critical sedimentation velocity of the formed flocs was 3.5 cm/min under optimal conditions. With this velocity, settlers with a surface load of 50.4 m³/m²/d can be designed, which is higher than the values commonly used in the design of settlers in water clarification plants intended for human consumption. In conclusion, the study shows that the use of potassium ferrate as a coagulant and oxidant is effective for the removal of organic matter and the discoloration of wastewater from the textile industry.

Keywords: Potassium Ferrate, Textile Industry Wastewater Treatment, COD Removal, Discoloration, Settling Velocity.

1. INTRODUCCION

En Bolivia, un gran número de pequeñas empresas que se dedican al lavado y teñido de telas se encuentran operando en la actualidad. Hasta hace poco, alrededor de 100 pequeñas fábricas de vaqueros estaban operando activamente en la ciudad de Cochabamba, Bolivia [1].

El proceso de lavado y teñido incluye varios pasos en los que se requieren grandes cantidades de agua limpia: eliminación de las encías del tejido con detergentes, adición de color, fijación, neutralización con metabisulfuros y aclarado. Además, cada uno de estos pasos va seguido de un enjuague. Todo el proceso genera grandes volúmenes de aguas residuales altamente contaminadas que son parcialmente tratadas mediante un simple cribado y sedimentación de sólidos antes de su descarga al sistema de alcantarillado. Como resultado, la calidad de los efluentes no cumple con la normativa ambiental boliviana, especialmente en cuanto a niveles de concentración de Demanda Química de Oxígeno (DQO), cloruro, azufre, sólidos en suspensión, sólidos totales y sólidos totales disueltos [1]. El paso de adición de color requiere grandes cantidades de tintes sintéticos, principalmente tipos azo y antraquinona, que contribuyen a altos niveles de DQO según Zaconeta & Escalera [2]. Estas altas concentraciones de materia no biodegradable y color persistente

causan problemas a los organismos vivos en los cuerpos naturales de agua [3]. Los tintes orgánicos sintéticos usados por las lavanderías en Cochabamba se han identificado como Reactive Black 5 (RB-5), Reactive Blue 19 (RB-19) y Allura Red AC (AR-AC) [4].

El ferrato (VI) ha recibido atención como una alternativa verde para el tratamiento de aguas residuales industriales contaminadas orgánicamente debido a su alto potencial oxidativo y buenas propiedades coagulantes [3, 5]. En cuanto a su aplicación en la oxidación de colorantes sintéticos, la investigación se ha enfocado principalmente hacia la degradación de colorantes azoicos. Li *et al.* [6] y Xu *et al.* [7] usaron síntesis química húmeda para preparar una solución compuesta de ferrato (VI)-hipoclorito (10% NaClO y $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ en medios altamente básicos a 50-65 °C), para la oxidación de Orange II y rojo brillante Reactive X-3B, respectivamente. Otros autores utilizaron ferrato de potasio sólido comprado y fabricado por ellos mismos para preparar soluciones en condiciones ligeramente ácidas (rango de pH de 4 a 7) para el tratamiento del rojo brillante reactivo X-3B [8], naranja reactivo 16 [9], rojo reactivo 2BF [10] y Acidic Red-dye [11].

En cambio, los estudios sobre la decoloración por ferrato (VI) de RB-5, AR-AC y RB-19 han sido escasos [4] [12]. En todos los casos, previamente se preparó o sintetizó una solución de ferrato (VI) y luego se dosificó a la solución colorante en concentraciones adecuadas. En estos estudios, los valores porcentuales de eliminación de color fueron superiores al 90% tratando contenidos de colorante en el intervalo de 25-200 ppm, durante 15 a 60 min. También se han realizado varios estudios para la remoción del color y la remoción de la DQO en aguas sintéticas que contienen aproximadamente las mismas concentraciones de estos tintes en aguas residuales generadas en la práctica del teñido y lavado de telas. Los estudios se han enfocado en la síntesis y aplicación del ion ferrato en la degradación de color y DQO. Perez *et al.* [4] obtuvieron remociones de DQO de 84% para el Reactive blue 19 utilizando el ion ferrato sintetizado por vía húmeda combinado con hipoclorito de sodio y del 97% para el Allura red aplicando solo hipoclorito de calcio. Por otra parte, Escalera *et al.* [13] sintetizaron electrolíticamente el ion ferrato usando electrodos de virutas de acero comercial y lo aplicaron de manera simultánea a la decoloración de soluciones de cada tinte individual con remociones mayores al 95% y obteniendo sus constantes cinéticas basadas en un modelo de primer orden.

El uso de ferrato de potasio (VI) (K_2FeO_4) es un abordaje avanzado y apropiado para el tratamiento de este tipo de aguas residuales [14-16]. El K_2FeO_4 contiene un ion de hierro en el sexto estado de oxidación y, por lo tanto, se caracteriza por fuertes propiedades oxidantes asociados con el valor de su potencial de oxidación-reducción, que en un ambiente ácido es 2.2V, mientras que en un ambiente alcalino – 0,72 V. En un ambiente acuoso $\text{Fe}(\text{VI})$ se reduce a $\text{Fe}(\text{III})$, que precipita en forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Por lo tanto, el K_2FeO_4 puede actuar bidireccionalmente, es decir, como un oxidante en una primera etapa y como un coagulante en la segunda etapa del proceso de purificación.

A nuestro entender, no se han realizado todavía estudios que usen el ion ferrato como agente de degradación en la remoción de la materia orgánica y la degradación de los tintes sintéticos contenidos en las aguas residuales generadas en los procesos de teñido y lavado de telas. En este estudio se presentan resultados de la síntesis de ferrato de potasio y su aplicación al tratamiento de tales aguas residuales colectadas de una lavandería cochabambina.

2. MATERIALES Y METODOS

▪ Recolección de muestras

Se recolectaron muestras de agua residual de los tanques subterráneos de sedimentación de la empresa tintorera en bidones de plástico de 20 litros.

▪ Análisis de características de agua residual y agua tratada

Los métodos de análisis se realizaron en base a los métodos estándar establecidos en el compendio Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, SMWW, publicado por la Asociación Americana de Salud Pública (APHA) y la Federación de Control de Agua (WCF) de los Estados Unidos de América para el análisis de agua residual y de agua tratada [17]. Se analizaron el pH, la conductividad eléctrica específica (CE), la turbiedad, los sólidos suspendidos totales como parámetros físicos. Los parámetros químicos fueron: calcio, magnesio, hierro y dureza total; la demanda química de oxígeno (DQO total y soluble). Los aniones fueron sulfatos, cloruros, y fosfatos.

▪ Determinación de la concentración de ion ferrato en el ferrato de potasio

El ferrato de potasio se molió utilizando un mortero. Se pesó 0,04 g y se agregó 5 ml de una solución de KH_2PO_4 3,3 mM y se aforó a un volumen conocido. Una vez formada la solución se filtró en microfiltros de 0,45 μm con ayuda de una jeringa de vidrio (se puede realizar una filtración previa por medio de una filtración al vacío o una separación por medio de centrifugación). La absorbancia de la solución es medida a una longitud de onda de 510 nm y se calcula la concentración de ferrato en solución utilizando la absorptividad molar del ferrato (VI) de $1150 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$, para ello se usó un espectrofotómetro Shimadzu UV-1601 en celdas de cuarzo de un paso de luz de 1 cm.

De igual manera se realizó el análisis de espectros de las aguas residuales tratadas, previamente filtradas con microfiltros de 45 μm .

▪ **Síntesis de ferrato de potasio granular**

El equipo y el producto se muestran en la Figura 1. Como reactor se usó un evaporador rotatorio acoplado con un frasco de sección aproximadamente rectangular (frasco de café instantáneo). Esta sección es adecuada para la mezcla de los polvos finos de reactivos. El evaporador rotatorio está conectado con una bomba de vacío que propicia la existencia de aire seco dentro del recipiente. El frasco está parcialmente sumergido en un baño de agua cuya temperatura puede regularse convenientemente.



Figura 1: Equipo de síntesis de ferrato de potasio y gránulos producidos.

La mezcla de los componentes necesarios para la síntesis de ferrato de potasio (hipoclorito de calcio, sulfato ferroso e hidróxido de potasio) está indicada en la Patente US20050053543 [18]. Dentro de la misma se tienen rangos de proporciones para los reactivos mencionados. Inicialmente se especifica que la cantidad de hidróxido debe ser 2, 3 o 4 veces menor que la de la mezcla de hipoclorito y sulfato ferroso. De forma inicial se consideró que la suma de hipoclorito y sulfato ferroso sea 3 veces mayor a la cantidad de hidróxido. Adicionalmente se tenía la especificación que la relación entre hipoclorito y sulfato ferroso debe estar entre 45/55 a 55/45.

El sulfato ferroso utilizado fue secado por 12 horas a 200°C según lo especificado en la patente. El hipoclorito de calcio fue secado durante 2 horas a 95°C. El secado se realiza para evitar la formación de gotas de agua dentro del reactor ya que la misma perjudica la calidad del producto durante la formación de los gránulos.

▪ **Diseño experimental para la remoción de DQO**

Se utilizó un diseño factorial de 2 factores a 3 niveles. Las variables independientes fueron el pH (5, 7 y 10) y la dosis de ion ferrato (90, 120 y 150 mg-FeO₄/l). Las variables de respuesta fueron la demanda química de oxígeno disuelto (DQOs), la demanda química de oxígeno total residual (DQOt, que incluye la materia orgánica disuelta y suspendida) y sus respectivas eficiencias de remoción, además de la concentración de hierro residual. En todos estos experimentos se usó la técnica descrita por Arboleda [19]. El licor se introdujo en un vaso de precipitado de 2 litros adaptado a un agitador de paletas de 3" x 1", se introdujo la dosis seleccionada de ion ferrato y se fijó un tiempo de agitación rápida de 1 min a 300 rpm, seguido de un tiempo de agitación lenta de 20 min a una velocidad de corte controlada de 33 s⁻¹ (45 rpm). Estas últimas condiciones son típicas de procesos de coagulación y floculación en los tratamientos de aguas de suministro y aguas residuales industriales [19]. La DQOt se determinó en muestras del sobrenadante obtenido luego de 30 minutos de sedimentación. La DQOs se midió luego de filtrar las muestras decantadas en filtros de papel de aproximadamente 1 micra de porosidad.

En pruebas preliminares se determinó que el ferrato de potasio al ser de carácter básico, al mezclarse con el licor (que puede ser ligeramente ácido al momento de ser recolectada la muestra), incrementó el pH de la solución a valores mayores a 10 conforme transcurría el proceso, afectando la eficiencia de la remoción de DQO. Por esta razón, el pH se reguló con la adición de H₂SO₄ 5N.

▪ **Determinación de la velocidad de sedimentación**

Para determinar la velocidad de sedimentación de los flóculos de Fe(OH)₃ formados en la reducción del ion ferrato, Fe(VI) a hierro trivalente, Fe(III) se utilizó la metodología experimental descrita por Arboleda [19], utilizando un vaso de precipitado de 2 litros y un agitador de paletas de 3" x 1". Las muestras se obtuvieron por medio de la ayuda de un sifón, construido con un tubo de vidrio de 4 mm de diámetro interno, provisto de un flotador de plastofórmico que permitirá mantener la succión generando vacío dentro del recipiente. La profundidad de la succión fue de 7 cm.

Después de haber realizado la mezcla lenta se procedió a insertar en el vaso de precipitado el sifón de forma inmediata. Se obtuvieron muestras desde el inicio y a cada tiempo previamente determinado en diferentes envases. Luego se procedió a la lectura de las muestras en un nefelómetro.

Antes de iniciar la lectura con el nefelómetro se agitó vigorosamente cada muestra para poder destruir los flóculos formados y homogenizar la muestra. Luego se realizó una agitación de forma circular y envolvente para eliminar las burbujas. Se tomó la primera lectura que se observó en la pantalla del nefelómetro. Se repitió el mismo procedimiento para cada una de las muestras.

▪ Degradación de color

Se realizó una prueba de jarras con la técnica de Arboleda [19]. La dosis de ion ferrato utilizada fue de 120 mg/l. Se agregó el ferrato de potasio antes de comenzar la agitación rápida, y después se dosificó el H₂SO₄ 5N para que el pH llegue al valor deseado 7 o 10 a lo largo del tratamiento. La agitación rápida fue de 5 minutos y la lenta a 33 s⁻¹ tardó 20 min. Después de un tiempo de sedimentación de 30 min, se tomaron muestras de la solución decantada y se filtraron en un microfiltro de jeringa de 0,45 µm. Luego se registraron sus espectros UV-Vis en el rango de 190 a 900 nm.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Optimización de condiciones de operación para la síntesis de ferrato de potasio

Luego de varias pruebas se optimizaron las proporciones de reactivos que se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1 - CONDICIONES DE OPERACIÓN EN LAS PRUEBAS DE SÍNTESIS DE ION FERRATO EN SECO

<i>Condiciones de operación</i>	
Temperatura del baño, °C	80
Tiempo, h	4
Rotación del reactor, rpm	30
Inclinación	45° - 50° respecto de la vertical
<i>Masa de reactivos</i>	
Hipoclorito de calcio, g	8,25
Sulfato ferroso, g	6,75
Hidróxido de potasio, g	5,00
Proporción hipoclorito/sulfato	55/45

Con estas condiciones, se obtuvo el ferrato de potasio seco con las especificaciones que se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2 – CALIDAD DEL FERRATO DE POTASIO SINTETIZADO

Gránulos formados, g	4,99
Mezcla de polvo restante	7,25
Concentración de ferrato de potasio en el granulo, %	11,72
Concentración de ion ferrato en el granulo, %	6,10

3.2. Composición del agua residual

La Tabla 3 muestra los resultados de los parámetros de la calidad fisicoquímica del agua residual colectada en el tanque de sedimentación de una lavandería – teñidora de telas ubicada en la zona sud de la ciudad de Cochabamba. Los resultados se comparan con los valores de los límites permisibles establecidos en el Reglamento Ambiental para el Sector Manufacturero, RASIM [20]. Se puede observar que los parámetros que superan esos límites, son: la materia orgánica total (disuelta y particulada), DQOt, los sólidos suspendidos totales (SST) y los cloruros. La calidad medida es típica de las aguas residuales provenientes de este sector, por la cantidad de tintes orgánicos, detergentes y otros compuestos añadidos que aportan a la DQOt y por la generación de hilachas durante el proceso y lavado, que son producto de la fricción entre telas y que contribuyen a la concentración de sólidos suspendidos totales. El cloruro residual alto también es común, debido a la adición de sal común en el proceso de teñido. Debido a esta adición la conductividad específica es particularmente alta. En conclusión, el agua residual no satisface los requerimientos legales establecidos en el RASIM. En consecuencia, la empresa debe tratar este licor residual.

3.3 Análisis e interpretación de los resultados de las corridas realizadas según el Diseño Experimental Estadístico

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos del contenido residual de DQO total, DQO soluble, eficiencia de remoción de DQO disuelto y la concentración residual de hierro soluble en aguas tratadas en función del pH y la dosis de ion ferrato, para cada una de las corridas realizadas según el diseño experimental estadístico adoptado. Los porcentajes de

remoción DQO total y soluble fueron calculados sobre la base de la DQO total en el agua residual sin procesar (1992 mg-O₂/l).

TABLA 3 – CALIDAD FISICOQUIMICA DEL AGUA RESIDUAL DE LAVANDERIA

Parámetro	Método	Resultado	Límite permisible RASIM [20]
Turbiedad, NTU	Nefelométrico	107	200
pH	Potenciométrico	6,7	6,0 – 9,0
Conductividad específica, CE, μS/cm	Potenciométrico	8080	-
Sólidos suspendidos totales, SST, mg/l	SMWW 2540	272	60
DQO total, mg-O ₂ /l	SMWW 5220	1922	250
Dureza total, mg-CaCO ₃ /l	SMWW 2340	183,8	-
Calcio, mg-Ca ²⁺ /l	SMWW 3500 – Ca B	36,84	400
Magnesio, mg-Mg ²⁺ /l	SMWW 3500 – Mg B	35,86	150
Hierro, mg-Fe/l	SMWW 3500 – Fe B	0,065	1,0
Sulfatos, mg- SO ₄ ²⁻ /l	SMWW 4500 – SO ₄ ²⁻ E	0,62	400
Cloruros, mg-Cl/l	Balance de materia del proceso	1323	500
Fosfatos, mg-P/l	SMWW 4500 – P C	0,2	-

TABLA 4 – RESULTADOS DE DQO TOTAL, DQO SOLUBLE Y HIERRO RESIDUAL EN EL AGUA TRATADA SEGÚN EL DISEÑO EXPERIMENTAL PROPUESTO

 DQO INICIAL = 1992 mg-O₂/l

Corrida N°	Dosis de ion ferrato, mg FeO ₄ ²⁺ /l	pH, -	DQO total residual, mg-O ₂ /l	% remoción DQO total	DQO soluble residual, mg-O ₂ /l	% remoción DQO soluble	Hierro residual soluble, mg/l
1	90	5	808	57,97	504	73,8	0,122
2	150	5	634	67,01	500	74,0	0,091
3	120	5	734	61,84	689	64,1	0,091
4	120	10	910	52,65	883	54,1	0,124
5	90	7	640	66,69	350	81,8	0,155
6	90	7	701	63,54	339	82,4	0,137
7	150	7	662	66,69	624	67,5	0,098
8	120	5	908	52,73	682	64,5	0,100
9	120	10	964	49,83	854	55,6	0,079
10	150	5	604	68,60	430	77,6	0,104
11	150	10	811	57,80	762	60,4	0,124
12	150	10	768	60,02	670	65,1	0,106
13	120	7	994	48,30	774	59,7	0,092
14	120	7	1029	46,45	916	52,3	0,099
15	90	5	872	54,60	758	60,6	0,087
16	150	7	967	49,70	696	63,8	0,094
17	90	10	922	52,04	804	58,2	0,099
18	90	10	828	56,95	738	61,6	0,096

En la Tabla 4 se observa claramente que las condiciones óptimas son pH = 7 y dosis de ion ferrato de 90 mg/l para una remoción de DQO soluble de aproximadamente el 82%, que se obtendría si el agua tratada por coagulación y floculación se sometería a una filtración en filtros de arena rápidos, debido a la formación de flóculos de Fe(OH)₃ de buen tamaño y buena velocidad de sedimentación. En cambio, en las mismas condiciones, la eficiencia de remoción de DQOt alcanzó a valores entre el 63,5 y el 66,7% y DQOt entre 640 y 701 mg/l. La diferencia en los porcentajes de remoción se puede explicar por el todavía alto contenido de materia orgánica residual en los pequeños sólidos no sedimentables. Por otra parte, se observa también que el hierro residual soluble en muestras decantadas y filtradas se ha incrementado levemente desde 0,065 mg/l hasta un promedio (en las 18 corridas) de 0,105 mg/l, pese a la adición de hierro soluble proveniente del ferrato de potasio añadido. Este aspecto también indica que la formación, precipitación, sedimentación y filtración de los flóculos de Fe(OH)₃ ha sido efectiva.

La dosis de ferrato de potasio, las condiciones de pH y la eficiencia de remoción de DQO obtenidos en este estudio son similares a los reportados por Thomas *et al.* [21] quienes obtuvieron un 81,4% de remoción de DQO tratando aguas sintéticas con RB-5 con una DQO inicial de 156 mg-O₂/l, a pH 7 y con una dosis de ion ferrato de 100 mg/l.

Debido a la alta concentración de DQO en el agua sin tratar, aunque las eficiencias de remoción son altas en las condiciones óptimas, el contenido de materia orgánica residual disuelta de aproximadamente 345 mg-O₂/l y 671 mg-O₂/l para la materia orgánica total todavía no satisfacen el requerimiento normativo de 250 mg/l para descarga al sistema de alcantarillado municipal. Sin embargo, se debe comentar que el valor de DQO contenido en las aguas municipales que ingresan a la planta de tratamiento de Cochabamba alcanzan a 656 mg-O₂/l bastante mayor al valor establecido por el RASIM [22].

(a) Efecto de los factores seleccionados sobre la remoción de materia orgánica

Los efectos individuales de cada factor se muestran en las Figuras 2 y 3 donde se presentan los valores promedio de DQO disuelto determinadas en las 18 corridas realizadas de acuerdo con el diseño experimental, en función de los tres niveles de cada factor, para un intervalo de confianza del 95%. Se observa que se obtienen menores concentraciones de DQO cuando el pH varía de 5 a 7 y la dosis de ion ferrato es 90 mg/l y también 150 mg/l. Consecuentemente, las condiciones más favorables económicamente serán 7 para el pH y 90 mg/l para la dosis.

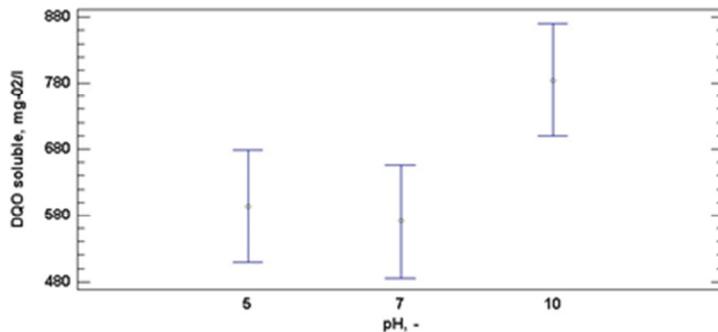


Figura 2: Efecto del pH sobre valores medios de concentración residual de DQO soluble después del tratamiento con ferrato de potasio sintetizado (n = 18, 95% intervalo de confianza).

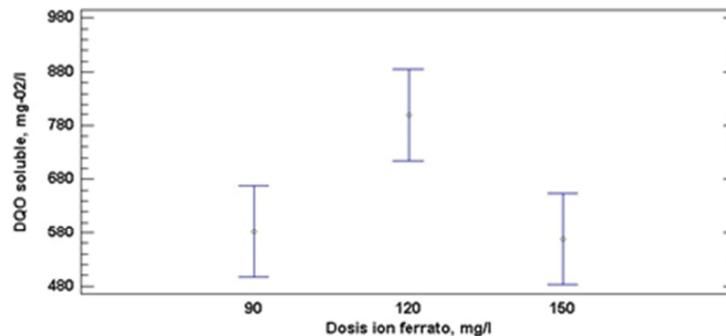


Figura 3: Efecto de la dosis de ion ferrato sobre valores medios de concentración residual de DQO soluble después del tratamiento con ferrato de potasio sintetizado (n = 18, 95% intervalo de confianza).

(b) Valores óptimos de pH y dosis de ion ferrato en la remoción de DQO

La superficie de respuesta, Figura 4, de la eficiencia de remoción de DQO soluble en muestras del agua tratada, en función del pH y la dosis de ion ferrato, muestran que se alcanzan valores óptimos en el intervalo de 6,5 a 7,5 para el pH y 85 a 95 mg/l para la dosis de ion ferrato. Por consiguiente, estos intervalos de valores fueron considerados para las pruebas de coagulación, floculación y sedimentación que se describen posteriormente.

(c) Degradación del color

Se efectuaron pruebas de degradación de color controlando el pH con ácido sulfúrico añadiendo 120 mg/l de ion ferrato. Los resultados se muestran en la Figura 5.

Los espectros del agua tratada y filtrada (Figura 5) muestran que los picos en la región visible (400 – 780 nm) se han reducido considerablemente (más del 80%) a valores de pH de 7 cuando se aplica H₂SO₄. Esta disminución se explica por la oxidación completa de los cromóforos azo de los tintes RB-5 y Allura Red AC y de los cromóforos del tipo quinoide del tinte RB-19. En el intervalo de 210 - 400 nm, los espectros obtenidos muestran una disminución gradual

de la intensidad a medida que el pH disminuye de 10 a 7, mostrando una oxidación parcial de los grupos aromáticos sin la generación de compuestos intermedios (no se observa la aparición de picos nuevos).

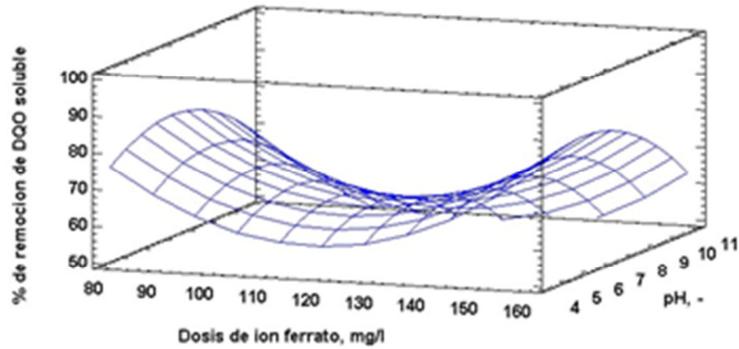


Figura 4: Superficie de respuesta del porcentaje de remoción de DQO soluble después del tratamiento con ferrato de potasio sintetizado (n = 18, 95 % intervalo de confianza).

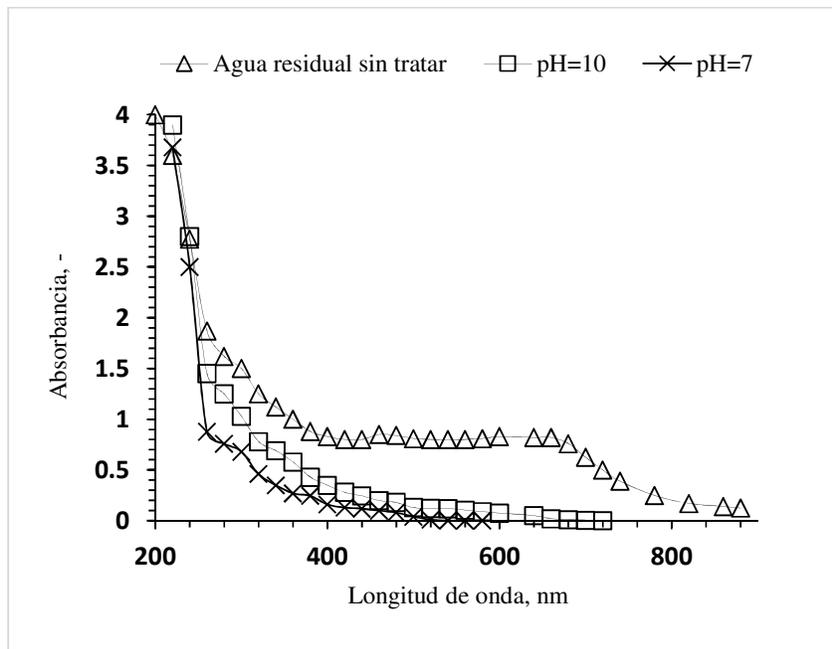


Figura 5: Espectros de absorbancia obtenidos en el tratamiento del agua residual filtrada a diferentes valores de pH regulados con ácido sulfúrico.

3.4 Determinación de la velocidad de sedimentación de los flóculos de Fe(OH)₃

La Tabla 5 muestra los datos de turbiedad Nt en unidades nefelométricas de turbiedad, UNT, en función del tiempo, el cociente C = Nt/No en % (No = turbiedad inicial), y la velocidad de sedimentación calculada con la profundidad de 7 cm.

TABLA 5 – RESULTADOS DE LA PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN

Tiempo (min)	Turbiedad, Nt, (UNT)	Velocidad de sedimentación (cm/min)	C = Nt/No x 100
0	276,5		
1	244,5	7,00	88,43
2	131,5	3,50	47,56
3	78	2,33	28,21
5	30,45	1,40	11,01
8	23,8	0,88	8,61

Se usó la ecuación propuesta por Hazen [20] para calcular la velocidad de sedimentación crítica v_{sc} para una remoción de la turbiedad porcentual R_t del 90%

$$R_t = \left(100 - (C_0 - C_f)\right) + \frac{A}{v_{sc}} \quad (1)$$

donde el área A esta representada por la integral:

$$A = \int_0^{C_0} v_s dC \quad (2)$$

Por otra parte, C_0 = el cociente porcentual que corresponde a la velocidad crítica y C_f = el cociente porcentual que corresponde a la velocidad de sedimentación mínima del área sombreada en la Figura 6.

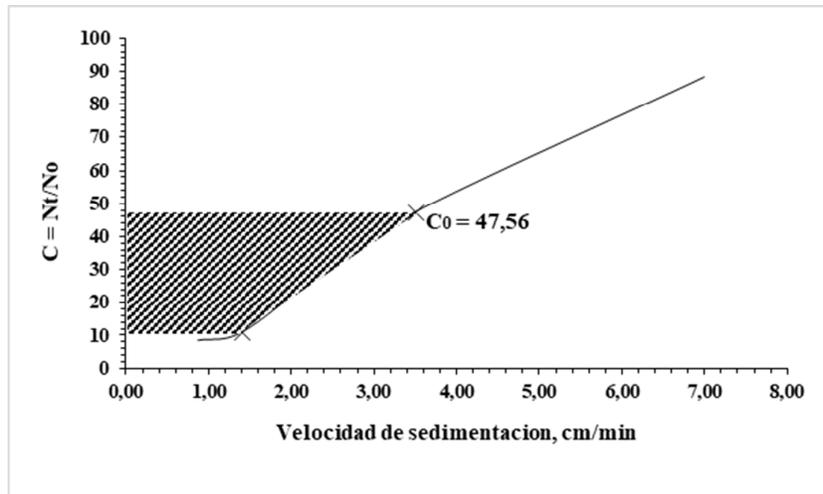


Figura 6: Relación experimental entre el cociente porcentual C y la velocidad de sedimentación.

Se obtuvo una velocidad crítica de sedimentación de 3,5 cm/min, un valor comparable a las velocidades de sedimentación observadas para flóculos de arcilla generados en las plantas de tratamiento de clarificación de aguas de suministro (2,9 – 4,1 cm/s). El valor de v_{sc} también representa una carga superficial (capacidad de tratamiento) de un sedimentador ideal de 50,4 $m^3/m^2/d$. Comúnmente los sedimentadores se diseñan con cargas superficiales menores entre 10 y 20 $m^3/m^2/d$. Esto significa que con la velocidad de sedimentación crítica obtenida experimentalmente de 3,5 cm/min se obtendrían mayores rendimientos o eficiencias de remoción R_t en caso de que se diseñe un sedimentador con las cargas superficiales comúnmente usadas.

4. CONCLUSIONES

Este estudio investigó el uso de ferrato de potasio sintetizado como opción de tratamiento para la remoción de la materia orgánica (DQO) y del color contenidos en aguas residuales de una planta teñidora y lavadora de telas. Los tintes orgánicos industriales usados en el proceso son: Reactive blue 19, Allura red y Reactive black 5. Como resultado de un diseño experimental a temperatura ambiente, se encontró una dosis óptima de ion ferrato de aproximadamente 90 mg- FeO_4^{2-}/l a un pH = 7, condiciones que generaron una eficiencia de remoción de DQO disuelto de 82%. La eficiencia de remoción de color fue mayor al 80% a pH = 7 y una dosis de ion ferrato de 120 mg/l. El proceso de coagulación-floculación tarda 21 min; i.e. 1 min de agitación rápida y 20 min de agitación lenta y controlada a una velocidad de corte de $33 s^{-1}$. La velocidad de sedimentación crítica de los flóculos formados fue de 3,5 cm/min en las condiciones óptimas. Con esta velocidad se puede diseñar sedimentadores de una carga superficial de 50,4 $m^3/m^2/d$ que es superior a los valores usados comúnmente en el diseño de sedimentadores en las plantas de clarificación de aguas destinadas al consumo humano. En conclusión, el estudio demuestra que el uso del ferrato de potasio como coagulante y oxidante, es efectivo para la remoción de la materia orgánica y la decoloración de aguas residuales provenientes de la industria textil.

REFERENCIAS

- [1] A. Camacho. "Lineamientos para el plan estratégico sectorial de gestión de aguas residuales en lavanderías de jeans en Cochabamba", Cochabamba, 2016.
- [2] A. Zaconeta y R. Escalera. "Desarrollo de un sistema de reciclaje de aguas residuales textiles coloreadas mediante la utilización de un fotoreactor solar". *Investigación y Desarrollo*, vol. 10, pp. 37-48, 2010

- [3] S. Barişçi, O. Turkay, and A. Dimoglo, "Review on Greywater Treatment and Dye Removal from Aqueous Solution by Ferrate (VI)", in *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*, vol. 1238, American Chemical Society, 2016, pp. 14–349.
- [4] P. Pérez, S. Ibañez-Calero y R. Escalera, "Degradation of synthetic organic dyes in solution by ferrate-hypochlorite or calcium hypochlorite", *Investigación y Desarrollo*, vol. 1, n° 17, pp. 43–53, 2017.
- [5] Y. Lee, M. Cho, J. Y. Kim, and J. Yoon. "Chemistry of ferrate (Fe (VI)) in aqueous solution and its applications as a green chemical". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry-Seoul*, vol. 10, n° 1, pp. 161–171, 2004.
- [6] G. Li, N. Wang, B. Liu, and X. Zhang. "Decolorization of azo dye Orange II by ferrate(VI)–hypochlorite liquid mixture, potassium ferrate(VI) and potassium permanganate". *Desalination*, vol. 249, n° 3, pp. 936–941, 2009.
- [7] G. R. Xu, Y. P. Zhang, and G. B. Li. "Degradation of azo dye active brilliant red X-3B by composite ferrate solution". *J. Hazard. Mater.*, vol. 161, n° 2–3, pp. 1299–1305, 2009.
- [8] Q. Han, W. Dong, H. Wang, T. Liu, F. Sun, Y. Ying and X. Yan. "Effects of coexisting anions on decolorization of azo dye X-3B by ferrate(VI) and a comparative study between ferrate(VI) and potassium permanganate". *Sep. Purif. Technol.*, vol. 108, pp. 74–82, 2013.
- [9] S. Sahinkaya. "Decolorization of reactive orange 16 via ferrate (VI) oxidation assisted by sonication". *Turk. J. Chem.*, vol. 41, pp. 577–586, 2017.
- [10] X. Dong, L. Wang, X. Zhang, L. Bai, X. Zhang, H. Ma, C. Ma, and M. Xue. "Oxidative degradation of azo dye Reactive Red 2BF by potassium ferrate". *Adv. Mater. Res.*, vol. 523, pp. 2617–2620, 2012.
- [11] Y. Li and M. Li. "Treatment of acidic red-dye wastewater by ferrate (VI) oxidation". *J. Shenyang Jianzhu Univ. (Natural Sci.)*, vol. 27, pp. 737–740, 2011.
- [12] M. Villanueva, A. Hernández, J. M. Peralta-Hernández, E. R. Bandalab, and M. A. Quiróz. "In-situ Electrochemical Generation of Ferrate Ion [Fe(VI)] in Acidic Conditions: A Potential Wastewater Decontamination Process". *ECS Transactions*, pp. 411–416, 2008.
- [13] R. Escalera, U. Hosse and P. Perez. "Electrochemical oxidation of synthetic organic dyes by ferrate(VI) using commercial steel electrodes". *Investigación y Desarrollo*, vol. 18, n° 1, pp. 5 – 15, 2018.
- [14] M. Moradnia, M. Panahifard, K. Dindarlo and HA. Jamali. "Optimizing potassium ferrate for textile wastewater treatment by RSM". *Environmental Health Engineering and Management Journal*, vol. 3, n° 3, pp. 137-142, 2016.
- [15] N.A. Jaafarzadeh Haghighifard S. Jorfi, M. Ahmadi, S. Mirali and R. Kujlu. "Treatment of mature landfill leachate by chemical precipitation and Fenton advanced oxidation process". *Environmental Health Engineering and Management Journal*, vol. 3, n° 1, pp. 35-40, 2016.
- [16] K. Dindarloo, H.A. Jamali, P. Lakbala, H. Mahmoodi and F. Kazemi. "Feasibility of electrochemical oxidation process for treatment of saline wastewater". *Environmental Health Engineering and Management Journal*, vol. 2, n° 3, pp. 129-134, 2015.
- [17] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, SMWW. APHA, WCF, 20th Ed, 1999.
- [18] A. Kneip, J. Carol and A. Castetbon. "Method for preparing alkali metal ferrates and novel alkali metal ferrate granules." United States. Patent US 2005.0053543A1, Mar. 10, 2005.
- [19] J. Arboleda, "Teoría y Práctica de la Purificación del Agua". Ed. Acodal, Colombia, 1992.
- [20] Reglamento Ambiental del Sector Industrial Manufacturero, RASIM, aprobado por DS 26736 de 30/07/2002.
- [21] M. Thomas , S. Kliś , K. Barbusińsk and M. Chyc. "Removal of Acid Red 27, Reactive Black 5 and Acid Green 16 from Aqueous Solutions using Potassium Ferrate(VI)". *Fibres & textiles in Eastern Europe*, vol. 27, n° 4, pp. 71-75, 2019.
- [22] O. Coronado, O. Moscoso y R. Ruiz. "Estudio general del caso ciudad de Cochabamba, Bolivia". *Proyecto Regional, Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en America latina: Realidad y Potencial*. Convenio IRDC-OPS-CEPIS. Junio 2001.