

Remoción de colorantes de aguas residuales resultantes del tinturado de flores.

Manuela Giraldo Raigoza ^a

Jose David Medina Arroyave ^b

^a *Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia*

^b *Ingeniero de Procesos, Asesor del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia*

Resumen

El tratamiento del agua residual del tinturado de flores en Colombia ha sido poco trabajado. Estas requieren de un tratamiento previo al vertimiento en efluentes de agua debido a la alta contaminación que puede causar tanto visual debido a la coloración, o química por la alteración que tienen en diferentes parámetros de calidad del agua como lo son el pH, DBO y DQO cuyos rangos aceptados se encuentran fuera de lo regulado en el decreto 631 de 2015. Estas aguas presentan una alta carga de colorante debido a la gran solubilidad que estos muestran, por esto, la carga química es elevada al igual que la demanda biológica, teniendo valores mayores la primera, también son aguas poco turbias y tienden a presentar pH ácido. Durante este estudio se evaluó la calidad de las aguas del tinturado de flores y diferentes procesos como la coagulación donde se obtuvo una baja remoción de color equivalente al 0,2%, una disminución en sólidos suspendidos del 45,45%, DQO= 1,9% y DBO= 8,1%. En la adsorción se consiguió una remoción de color de 86,32% y la reacción Fenton presentó reducciones del DQO y DBO del 96,13 y 95,76% respectivamente. Se buscó restablecer a rangos permitidos, los parámetros que se encontraban fuera de la norma ambiental. Por último, se muestra un diseño conceptual de la planta de tratamiento implementando el proceso Fenton acompañado de adsorción. Adicionalmente, se presenta un estudio de viabilidad económica, determinando la factibilidad de su implementación, y una posterior comparación con el proceso usado por los cultivos actualmente.

1. Introducción

El sector agrícola posee gran importancia en Colombia debido al ingreso monetario que representa por las exportaciones y la cantidad de empleos que genera. La floricultura simboliza un 25% del empleo rural para las mujeres y genera aproximadamente 15 trabajos por hectárea, presentando la tasa de empleo más grande de las actividades de agricultura, alrededor de 130.000 trabajos de tiempo completo, y una contribución de más de un billón de US dólares en la balanza comercial [1]. Colombia es un país que lleva más de 5 décadas exportando flores; es el segundo exportador a nivel mundial de flores frescas y cortadas, y el primer proveedor de Estados Unidos con cerca del 80% del nivel de importación [2]. En poco más de cincuenta años del inicio de la industria de flores, Colombia ha presentado un rápido crecimiento tanto en prestigio como en tamaño; actualmente se tienen alrededor de 7284 hectáreas de invernaderos localizados principalmente en la Sabana de Bogotá con cerca de del 72% del área, Rionegro (Antioquia) un 27%, Zona Cafetera y Valle del Cauca un 1%. Ver **Anexo 3** [1] Antioquia es uno de los principales departamentos productores con mayor participación en la variedad de crisantemos; siendo esta una de las variedades con mayor promesa de crecimiento [3].

En la demanda de estas flores hoy en día, se exige una porción en colores artificiales, por ejemplo en la elaboración de ramos se necesitan flores de múltiples colores o decoradas con tonos brillantes, es por esto que en los cultivos se están realizando procesos de tinturado para cumplir los requisitos estéticos del mercado internacional; para los floricultores esta etapa representa de un 5% al 10% de las ventas y es un mercado en ascenso, algunos cultivadores se han especializado en el proceso de teñido manejan un alto volumen de tinturados que pueden representar un 15% del total de sus ventas, de acuerdo a la información suministrada en entrevistas con los floricultores.

El proceso de tinturado usualmente se realiza por una técnica denominada absorción, la cual se basa en sumergir el tallo de la flor en una solución coloreada con el pigmento, por principios de capilaridad y los requerimientos de hidratación de la planta, esta va tomando la coloración. Una vez terminado el proceso, el agua que no fue absorbida resulta como agua residual, esta debe ser tratada de manera especial antes de ser vertida a un cuerpo de agua. A medida que la industria ha venido creciendo y los requisitos de tinturado han aumentado por parte de los clientes, los desechos se han incrementado a la par. En el oriente antioqueño la mayoría de cultivos, envían estos a un tercero para que realice el tratamiento de las aguas, en el 2015 el costo del tratamiento para los cultivadores era superior a 500\$/L. Adicional al costo por el tratamiento algunas fincas deben cubrir con el transporte de los contenedores de agua residual al lugar de tratamiento, lo cual representa gastos adicionales, razón por la cual se ha planteado la posibilidad de instalar unidades de tratamiento en cada uno de los cultivos de forma que se disminuyan los costos de este.

Para dar solución a lo anterior se buscó el desarrollo de una alternativa de tratamiento que incurriera en menos gastos monetarios y logísticos, de forma tal que se asegurara que los cultivadores pudiesen verter o reutilizar en sus procesos las aguas residuales de acuerdo a las características físico-químicas estipuladas en resolución 0631 de 2015 [4] **Anexo 1** en relación a los parámetros de pH, sólidos suspendidos DQO y DBO₅, considerando además los parámetros de turbidez, color y conductividad; puesto que verter este tipo de aguas sin tratamiento adecuado representa una fuente de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas causando afectaciones en la vida silvestre y la salud del hombre [5], adicionalmente estos parámetros poseen una facilidad en la medición de estos, con bajos costo y permiten tener claras las aproximaciones a los resultados finales de demandas químicas y biológicas.

En la literatura se han reportado diferentes tratamientos de aguas residuales con colorantes, estos concuerdan en que la eliminación de estos colorantes (en su mayoría tipo azo) representan actualmente un reto ambiental para la industria y la academia [6]; para el proceso Fenton se ha encontrado buenos resultados con degradaciones del 100% de color, mineralización de 70,1% usando 60 mg/L FeCl₃ y 1,0 mL/L de H₂O₂ [7] otro estudio mostro porcentajes de mineralización superiores al 90% después de 40 minutos, 30 mg/L de FeCl₃ y 1% v/v de de H₂O₂ [8]. Para la fotocatalisis heterogénea con titanio, los valores óptimos para la degradación de aguas del tinturados de flores se encontró un pH= 6.0, H₂O₂ = 1,5 mL/L, con una decoloración del 84%. En cuanto a la adsorción se ha mostrado una remoción de color con carbón activado comercial de 95-98% [9]. Para la coagulación se encontraron estudios donde se conseguía alrededor del 85% de remoción de DQO y 96% de color con concentraciones cercanas a 0,75mM de cloruro férrico para colorantes dispersos. Para el caso de colorantes reactivos se consiguieron remociones de color cercanas al 65% para los colorantes reactivos a concentraciones mayores a 1,9mM de cloruro férrico [10].

Se deseaba entonces evaluar los procesos de adsorción, coagulación química y Fenton, a escala de laboratorio para remover los colorantes presentes en las aguas residuales resultantes del tinturado de flores, con la finalidad de establecer el tratamiento capaz de obtener un agua que cumpliera con los requisitos de la legislación ambiental en cuanto a DBO, DQO, pH y sólidos suspendidos, además según la cantidad de reactivos utilizados se estableció el costo aproximado por proceso, se definieron estas mediciones debido a la capacidad económica propia del proyecto. Para la evaluación de la adsorción se determinó la capacidad de adsorción a diferentes condiciones de equilibrio, en el caso de la coagulación química y Fenton se ejecutó un diseño de experimentos con la finalidad de encontrar

la dosis de coagulante y el pH adecuado para el primer proceso y la concentración de Hierro y H_2O_2 para el segundo, para encontrar las condiciones que remuevan la mayor cantidad de contaminantes.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

2.1.1 Reactivos

Para la caracterización y ensayos de procedimientos de las aguas, se emplearon pigmentos proporcionados por los floricultores, sulfato de aluminio 95%, carbón activado granular, hidróxido de sodio 96%, ácido sulfúrico 98%, sulfato de hierro heptahidratado 95%, H_2O_2 50%. Como proveedor se tomó Protokimica y agua desionizada.

2.1.2 Elementos y equipos de laboratorio.

Tanto para la caracterización de las aguas como para la evaluación de los procesos se hizo uso de crisol, vidrio reloj, desecador, filtro de 0,45 μm , beakers, pipetas y micro pipetas y se emplearon el pHmetro Metrohm 827, Conductímetro Extech, Turbidímetro Orbeco Hellige modelo 966, espectrofotómetro UV-Visible Spectronic modelo 2pc, plancha de calentamiento Corning modelo pc-420-D, balanza analítica Satorius modelo practium.

Adicional a los equipos e implementos nombrados anteriormente se empleó el Software Statgraphics.

2.2 Metodología

2.2.1 Caracterización de las aguas.

Se recolectaron muestras de agua residual de 3 cultivos diferentes del oriente antioqueño, ubicados en La Ceja, La Unión y Llanogrande y se nombraron como muestra 1, 2 y 3 respectivamente, se tomó el agua residual ya filtrada de cada cultivo; y fueron almacenadas a $\approx 4^\circ C$ para evitar descomposición. Se realizaron mediciones de pH, conductividad, turbidez y espectroscopia UV-Vis, empleando los equipos descritos en la sección 2.1.2. Los sólidos suspendidos (SS) se cuantificaron siguiendo los lineamientos del método estándar 2130B [11]. Estas mediciones se realizaron en el laboratorio de técnicas instrumentales de la Universidad EAFIT, por otra parte, las mediciones de DQO y DBO_5 fueron realizados por un tercero interesado en la implementación del proyecto.

Los SS se calculan con la diferencia entre los sólidos totales y sólidos disueltos, el proceso de medición de los sólidos totales consiste en: i) tomar 25 mL de la muestra a medir y depositarla en crisol cerámico, ii) calentamiento lento hasta evaporación evitando calcinación, iii) enfriamiento en desecador, iv) cálculo de los SS por diferencia de pesos. Los sólidos disueltos se calculan siguiendo el mismo procedimiento, realizando una filtración previa de 0.45 micras.

2.2.2 Evaluación de los procesos de tratamiento de aguas

Coagulación

Los ensayos de coagulación se realizaron empleando sulfato de aluminio Tipo B comercial. Los factores operacionales que se tuvieron en cuenta fueron: la concentración de coagulante y el pH evaluados en un diseño de experimentos factorial completo en el cual la concentración de coagulante se evaluó a 5 niveles de 100 a 1000 mg/L de sulfato y el pH se evaluó a 3 niveles de 4 a 8, estos se resumen en la **Tabla 1** Las variables respuestas de la coagulación fueron: turbidez, pH y el porcentaje de remoción de color a las longitudes de onda característica de la solución. El diseño experimental propuesto contiene 15 ensayos y fueron analizados por medio del software estadístico Statgraphics empleando un intervalo de confianza del 95%. Se emplearon las herramientas de análisis estadístico

como la tabla ANOVA y diagrama de Pareto con el fin de establecer cuál fue el efecto de los factores sobre las variables respuesta y se definió cuales condiciones maximizan la remoción de turbidez.

Tabla 1. Diseño de experimentos factorial para el proceso de coagulación.

Factores	Niveles	
	Número	Valores
pH	3	4,6,8.
Concentración coagulante (mg/L)	5	100, 325, 550, 775, 1000.

El proceso de coagulación se desarrolló basándose en la norma técnica colombiana NTC 3903 la cual establece el procedimiento estándar para la evaluación de este proceso [12]. Se tomaron en beakers muestras de 100 mL, se les ajustó el pH y se agregó la cantidad de coagulante según el modelo de diseño de experimentos, este proceso se desarrolló con ayuda de una plancha de agitación con un agitador magnético, inicialmente con un agitación rápida de 150 rpm por alrededor de un minuto y se disminuyó al valor mínimo posible por aproximadamente 20 minutos, luego de este tiempo se retiraron los agitadores y se dejaron reposar las muestras 15 minutos, se tomó una muestra del sobrenadante y se realizaron las mediciones respectivas.

Se definieron los valores de pH de acuerdo a la condición inicial del agua en el caso del valor más bajo y se buscó ajustar el pH a un valor mayor debido a que la coagulación aumenta la acidez y funciona mejor en medios alcalinos.

Costos de coagulación

Para saber cuánto representaba los costos de reactivos se tomó la cantidad de gramos de sulfato de aluminio requeridos por litro de agua a tratar y el precio de este en g obteniendo entonces el costo con la siguiente ecuación.

$$c (\$/L) = \text{coagulate (g/L)} * (\$/(\text{g de coagulante})) \quad \text{Ecuación 1}$$

Adsorción

El proceso de adsorción fue evaluado únicamente sobre la muestra de agua 1 sin coagular debido a que los resultados de la coagulación no fueron favorables. Para los ensayos se empleó carbón activado granular comercial adquirido en Protokimica, **Anexo 4**. Se desarrolló una serie de experimentos donde la única variable considerada fue la longitud de onda inicial de los picos principales, mientras que la cantidad de carbón se mantuvo fija en 100g/L debido a la alta cantidad de colorante presente en las muestras. Durante los experimentos se midió el porcentaje de reducción de las longitudes de onda presentes, por la facilidad de medición de estos parámetros y la relación que puede tener la remoción de colorante con la disminución de DQO y DBO con cada experimento.

El procedimiento experimental consistió en tomar un volumen de solución de la muestra 1 equivalente a 100mL y a este se le adicionó la cantidad de carbón activado correspondiente para mantener una relación de 100 gramos de carbón/L, se agitó con ayuda de planchas de agitación y agitadores magnéticos en unas condiciones de 350-400 rpm, por 2 horas para que se alcanzara el equilibrio de adsorción y no se incluyó temperatura en la adsorción, consecutivamente se filtraba la solución para remover el carbón con filtro de papel y se medía la absorbancia para establecer la remoción de esta.

Para el costo de la adsorción se calculó la cantidad de carbón que se requería por litro.

$$\text{costo} = \frac{\text{g carbon}}{\text{L tratado}} * \left(\frac{22\$}{\text{gcarbon}} \right) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Fenton.

Los ensayos del proceso Fenton se efectuaron sobre la muestra 1, equivalente al agua con más características fuera de la norma y mayor contaminación. Se estableció un diseño de experimentos factorial completo en el que se consideraron como factores operacionales la concentración de hierro en un rango de 6 a 10 mM de hierro y la concentración de H₂O₂ de 0,376 a 1,129 moles de peróxido, en la **Tabla 2** se muestran resumidos estos valores. Las concentraciones de H₂O₂ se establecieron de acuerdo a porcentajes estequiométricos para remover la DQO de la muestra donde según un estudio encontrado la relación es equivalente a 2.125 g H₂O₂/g COD, mientras que la concentración de hierro se fijó basados en ensayos previos y buscando mantener relaciones másicas de H₂O₂/Fe⁺² alrededor de 11 (nivel medio de ambos factores) [13][14].

Tabla 2. Diseño de experimentos factorial para el proceso de Fenton

Factores	Niveles	
	Número	Valores
Concentración de Hierro (mM)	3	6,8, 10.
Concentración de H ₂ O ₂ (M)	3	0.376, 0.7525, 1.129

Inicialmente se ajustó el pH con un valor cercano a 3 [14] y se adecuó la concentración de hierro según los valores del experimento pertinente, seguidamente se adiciono el peróxido de hidrogeno dosificado en 5 inyecciones, 1 cada hora, para cada ensayo en la última reinyección se realizaron las mediciones pertinentes de características del agua como pH, turbidez, y demás características nombradas anteriormente, es necesario realizar la dosificación para evitar que hubiese un exceso de H₂O₂ y mantener la relación másica H₂O₂/Fe⁺² como se nombró anteriormente. Las variables de respuesta del diseño de experimentos fueron: el porcentaje de remoción de color a la longitud de onda característica de la solución y el pH después de las 5 horas de reacción.

El procedimiento de la reacción Fenton se basa en la mezcla de los reactivos: sulfato de hierro y peróxido de hidrógeno donde se forman hidroxilos que reaccionan para la descomposición a concentraciones correspondientes y agitación hasta que se cumpla con el tiempo de reacción, en donde el peróxido de hidrogeno se haya consumido para evitar alteraciones en los espectros. El objetivo del diseño de experimentos radicó en establecer las condiciones de operación que permitieran obtener un agua con la menor absorbancia empleando una cantidad adecuada de reactivos. Los resultados del diseño de experimentos fueron evaluados usando el software Statgraphics en el cual se plasmaron los análisis estadísticos de Varianza ANOVA, diagrama de Pareto, gráfico de probabilidad normal, estableciendo cual fue el efecto de los factores operacionales sobre las variables respuesta, adicionalmente se seleccionaron las mejores condiciones de operación.

$$\text{Hierro (mg)} = \text{Hierro (M)} * PM \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) * \text{volumen sln(L)} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\text{\$ por Hierro} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \text{Hierro (mg)} * \frac{\text{\$}}{\text{mg}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$H_2O_{2(mL)} = (H_2 O_2 (M) * PM(\text{g/mol})) / (\rho (\text{g/mL}) * \% \text{ pureza}) * \text{volumen sln(L)} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\text{\$ por } H_2O_2\left(\frac{mL}{L}\right) = H_2O_2(mL) * \frac{\text{\$}}{mL} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\text{\$ de } \frac{fenton}{L} = \left(H_2O_2(mL) * \frac{\text{\$}}{mL}\right) + \left(Hierro (g) * \frac{\text{\$}}{g}\right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Para el cálculo del costo correspondiente al tratamiento con el Fenton, se realizó una conversión de molaridad a gramos o mL para el hierro y el peróxido respectivamente en las ecuaciones 3 y 5, finalmente la suma de los costos de cada reactivo representa el costo total del tratamiento, como se muestra en la **Ecuación 7**

Verificación del cumplimiento de la legislación

Por cuestión de los costos involucrados en las mediciones no se realizaron las medidas de todos los parámetros considerados en la resolución 0631 durante la evaluación de cada proceso en particular, sin embargo, es necesario verificar que el agua tratada cumpla con otros parámetros estipulados relevantes en el tratamiento, únicamente para el mejor tratamiento se realizó la medición de la DBO y DQO.

2.3 Diseño conceptual

Para realizar el diseño conceptual se utilizó el tratamiento con mejores resultados encontrados, debido al alcance del proyecto, se hizo el dimensionamiento de equipos tomando un volumen promedio del cultivo que mayores residuos produce actualmente de los visitados, y el área que se puede disponer para este tratamiento. Usando como base las guías de Calidad del agua de Romero y “Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations” en parte como diseño para el tiempo necesario o tanques entre otros. [15], también se utilizaron las heurísticas de “Chemical Process Equipment” de Walas.

Se realizó además un estudio de los costos relacionados con la implementación de la planta teniendo en cuenta el consumo de H_2O_2 , $FeSO_4$, $NaOH$, H_2SO_4 como costos variables de la operación, también se tuvo en cuenta los gastos energéticos que se podían tener según la potencia de cada uno, por otra parte se tiene en cuenta la mano de obra necesaria al momento de trabajar la planta, la cual por los volúmenes trabajados necesita de 1 o 2 personas máximos, sin embargo se define el tiempo necesario para llevar a cabo el proceso.

3. Resultados y análisis

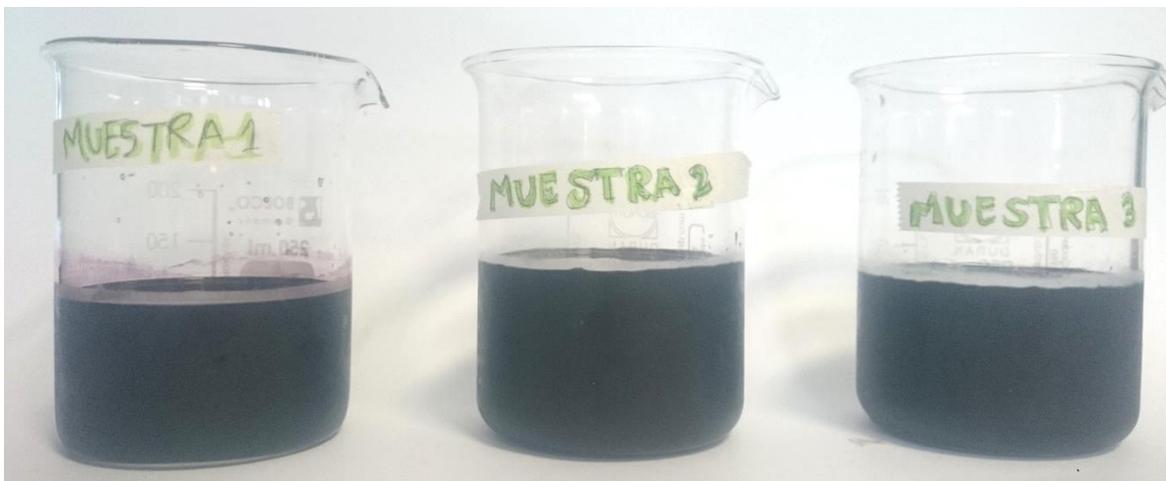


Figura 1. Muestras de aguas residuales

3.1 Caracterización del agua residual del proceso de tinturados de flores.

Se efectuó una caracterización inicial con el fin establecer la cantidad de contaminantes en el agua residual según la medida de DBO, DQO, turbidez, sólidos suspendidos; conocer cuáles de los parámetros de los tenidos en cuenta se encuentra por fuera de los límites permitidos en la resolución 0631 y cuantificar el efecto de los diferentes tratamientos aplicados, en la **Figura 1** se encuentran las 3 muestras de aguas recolectadas, donde se aprecia además que son aguas bastante oscuras, de la muestra 1 se pudo ver que las paredes del recipiente quedaron coloreadas a diferencia de las otras 2, la muestra nombrada es la que más coloración presenta.

En la **Tabla 3** se exponen los valores obtenidos de las muestras recolectadas en los cultivos de flores para los parámetros considerados junto con los valores establecidos en la legislación vigente para los vertimientos provenientes de esta actividad industrial (0631 de 2015 – art. 15. Otras actividades), algunas de las mediciones que no tienen un valor especificado en la resolución, se reportan, debido a que pueden dar bases para el monitoreo de la eficiencia de los diferentes tratamientos.

Los valores en rojo son aquellos que están fuera del límite permitido para el vertimiento, con lo que se confirmó la necesidad de realizar un tratamiento. Para las 3 muestras se observó que los valores de sólidos suspendidos, DQO y DBO estaban alejadas del límite máximo permisible, la muestra 1 es la que presenta valores mayores fuera de la normatividad, adicionalmente se observa que los valores obtenidos de turbidez son bajos independientemente de la gran cantidad de colorantes que estas aguas poseen, lo que muestra que estos son altamente solubles y no afectan de forma significativa este parámetro. La comparación se estableció con la legislación ambiental en el apartado de otras actividades donde la exigencia es mucho mayor, se toma el sector floricultor en otras actividades debido a que no tiene un apartado propio en la sección de agricultura, es decir que se debe basarse en los valores de otras actividades para el cumplimiento de la norma.

Tabla 3. Caracterización inicial

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Res 0631
-----------	-----------	-----------	-----------	----------

pH	4,46	8,21	6,92	6 – 9
Cd (mS/cm)	6,83	3,62	6,03	-
Coloración	Morada Intenso	Morada Intenso	Morada-Verdosa Intenso	-
Turbidez (NTU)	76	26	16	-
Sólidos Suspendidos (mg/L)	88	33	22	0,050
Concentración Estimada de colorante (g/L)	30,69	4,63	11,34	-
DQO (g/L)	24,56	3,98	10,51	0,150
DBO₅ (g/L)	3,07	0,53	1,28	0,050

La **Figura 2** muestra los barridos iniciales en el espectro UV-Visible de las 3 muestras; para realizar el barrido en el espectro UV-visible fue necesario hacer diluciones para cada una de estas, con factores de 500, 100 y 100 para las muestras 1, 2 y 3 respectivamente. Con esta gráfica se puede afirmar que las diferentes fincas floricultoras usan los mismos colorantes en diferentes concentraciones, debido a que los picos de máxima absorbancia se encuentran a las mismas longitudes de onda con diferentes intensidades. Basados en las diluciones realizadas es posible verificar que la muestra 1 al tener una dilución 5 veces más grandes que las otras, presenta mayores valores de absorbancia, por lo cual es la que mayores concentraciones de colorante presenta, esto coincide con que los valores de esta fueran los más altos en la **Tabla 3**. La diferencia que se observa en las magnitudes de la absorbancia, se explica debido a que en cada una de las fincas se enfocan en tonalidades diferentes y no son procesos estandarizados.

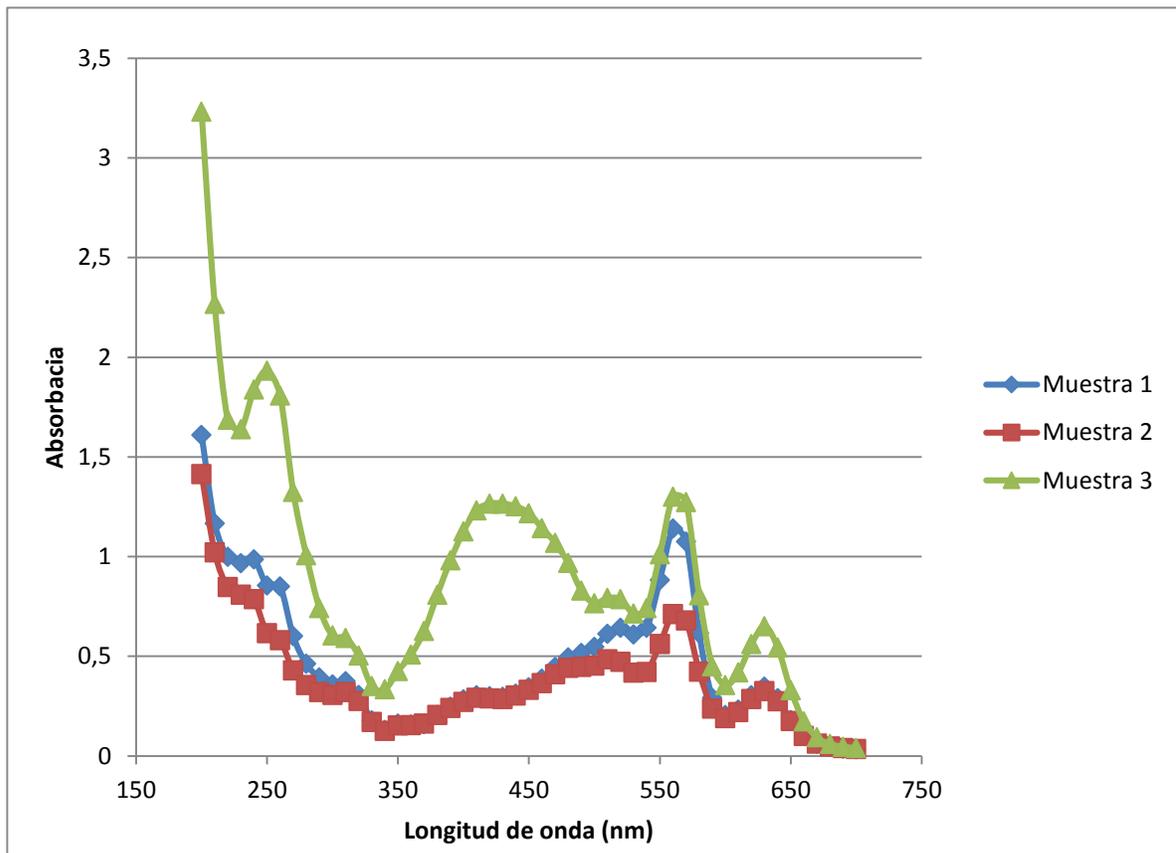


Figura 2. Espectros iniciales de las muestras recolectadas

3.2 Análisis experimental de los tratamientos propuestos

Coagulación

En la **Tabla 4** se muestran las corridas realizadas y los resultados obtenidos del diseño factorial para la coagulación, el color se reportó como porcentaje de remoción tomando la absorbancia inicial y final con el resultado de cada experimento, teniendo:

$$\%Remoción\ de\ color\ (\%RC) = \frac{Absorbancia\ inicial - absorbancia\ final}{absorbancia\ inicial} * 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

El porcentaje de remoción de color se analizó con respecto a una longitud de onda equivalente a 550 nm que se mostró como pico principal en las muestras analizadas.

Se decidió analizar este proceso puesto que en la literatura se encontraron diferentes estudios donde mostraron una buena remoción del color con el proceso de coagulación, adicionalmente hoy en día las empresas que tratan este tipo de aguas presentan la coagulación como una etapa del proceso.

Tabla 4. Resultados diseño factorial de la coagulación

Corrida	Factores de Operación		S/L	Variables Respuesta		
	pH	Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ (mg/L)		Turbidez (NTU)	Ph	%RC
1	6	325	0,78	39	5,42	0%
2	4	775	1,86	25	3,71	0%
3	6	1000	2,4	22	5,15	0%
4	6	550	1,32	28	5,35	0%
5	8	775	1,86	20	6,02	0%
6	8	550	1,32	23	6,34	0%
7	6	100	0,24	45	5,96	0%
8	4	100	0,24	46	3,9	0%
9	8	100	0,24	35	7,2	0%
10	4	325	0,78	42	3,87	0%
11	4	1000	2,4	26	3,68	0%
12	4	550	1,32	33	3,83	0%
13	8	325	0,78	27	6,75	0%
14	8	1000	2,4	20	5,8	0%
15	6	775	1,86	23	5,22	0%

De la **Tabla 4** se puede observar que la turbidez disminuyó en relación con los valores presentados iniciales de la **Tabla 3** para la muestra 1. La coagulación, es un proceso que busca eliminar las especies químicas suspendidas y con esto la turbidez del agua [16], la mínima turbidez encontrada fue para los experimentos número 5 y 14, en este caso la turbidez resultante (20 NTU) representa un disminución del 74% respecto al valor inicial, sin embargo, visualmente las mezclas continuaban iguales y el porcentaje de remoción de color mostró que no se tuvo ningún cambio representativo bajo ninguna de las condiciones de operación trabajadas, a diferencia de otras investigaciones que han reportado porcentajes de remoción de color de hasta 50% empleando coagulación química [17]. De los resultados se puede inferir que el tipo de colorantes empleados por la industria floricultora no aporta turbidez a las aguas y son pigmentos con alta solubilidad, por lo que la coagulación no funciona adecuadamente en este caso en donde el principal objetivo de tratamiento es la remoción de los colorantes presentes.

Es importante aclarar que en algunos casos el valor obtenido del %RC fue negativo, esto debido a la dilución que para las mediciones es necesaria realizar (1:500), lo cual puede inducir errores sobre el valor leído, aun cuando estos se trataron de minimizar midiendo los valores por duplicado.

Adicionalmente el pH con respecto al inicial para cada experimento disminuyó, esto se debe a que el sulfato de aluminio reacciona con el OH presente en el agua para formar hidróxidos y polihidroxidos de aluminio, disminuyendo la basicidad, aumentando entonces la acidez de estas. Esto se corrobora con la información presente en diferentes estudios donde mencionan que este coagulante presenta alteraciones en el pH y promueve la acidez [16], [18].

A continuación, se muestran los análisis estadísticos respectivos de este ensayo.

En la **Tabla 5** se presenta el resumen del análisis de la varianza ANOVA, en donde se incluyen los valores P para cada una de las variables respuesta con sus interacciones de segundo orden y el respectivo coeficiente de determinación R^2 .

Tabla 5. Análisis Varianza ANOVA Coagulación.

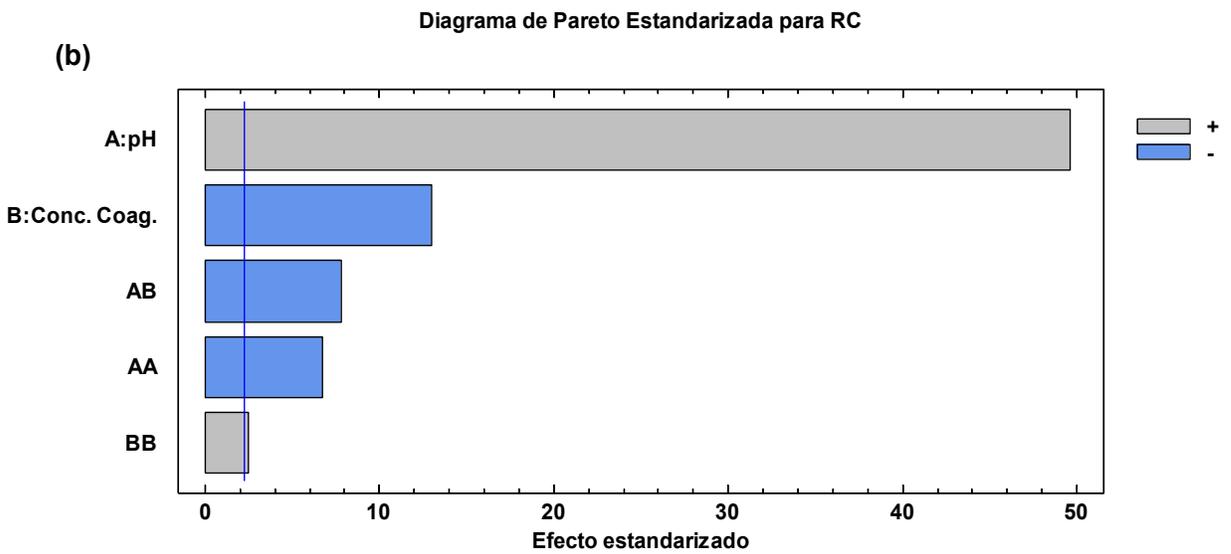
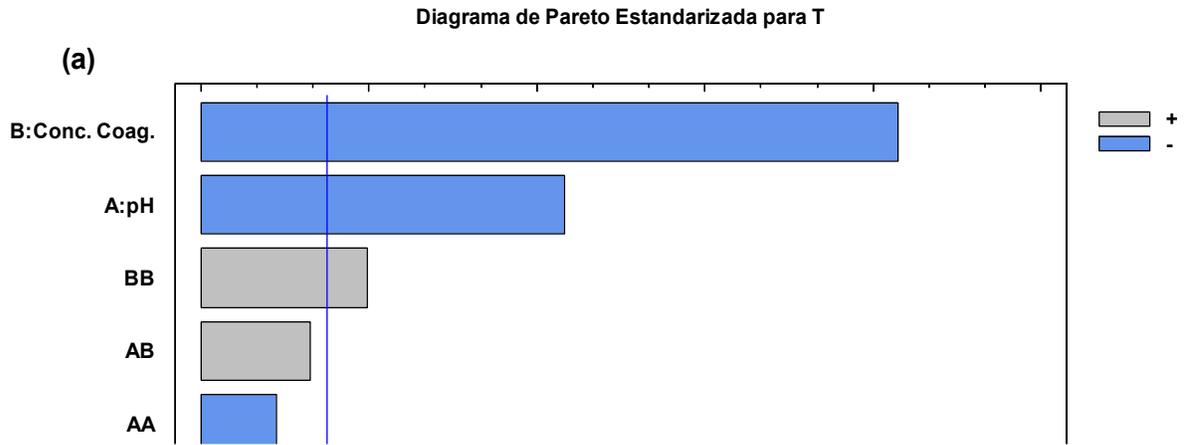
Resumen Análisis de la Varianza ANOVA			
Factor	Valor-P		
	Turbidez	pH	%RC
A:pH	0.0001	0.0000	0.1351
B:Concentración Coagulante	0.0000	0.0000	0.368
AA	0.2079	0.0001	0.6468
AB	0.0823	0.0000	0.0069
BB	0.0158	0.0345	0.8457
R^2	95.92%	99.7%	65%

Se observa que la concentración del coagulante (A) y el pH (B) inducen un efecto significativo sobre la turbidez y se presentan con color rojo, asimismo, el hecho de que el valor-p de la interacción BB sea menor a 0.05 implica que, en un modelo matemático de segundo orden, el término cuadrático de la dosis de coagulante influirá significativamente sobre la turbidez. Adicionalmente se tiene que para la turbidez el modelo presenta un R^2 equivalente al 95.92% teniendo una variabilidad de los datos explicada en su mayoría por el modelo. Para el pH todos los factores presentan valor-p menores a 0,05 siendo significativos sobre esta variable. Además, se tiene que para este caso el modelo con un R^2 de 99,7%, lo que significa que los datos se ajustan muy bien. Finalmente, la concentración de coagulante (A) y el pH (B) no son factores importantes para la remoción de color y el modelo generado a partir de estos factores no es útil para predecir el comportamiento de esta variable, como lo demuestra el bajo coeficiente de determinación encontrado.

En la **Figura 3** se muestran los gráficos pertinentes al diagrama Pareto para 2 variables de respuesta turbidez y pH. En cuanto la figura **(a)** se observa que muestran importancia de manera significativa la concentración de coagulante y el pH, teniendo la primera más peso frente a la variable de respuesta, además los factores se presentan con signos negativos (-) lo que significa una relación inversamente proporcional, a mayores concentraciones o valores de estos la Turbidez disminuye, es decir aumenta la remoción del material suspendido. En el caso de las interacciones se muestra que su valor p solo tiene significancia para BB en relación a la variable de interés.

En relación a **(b)** se observa que el valor inicial de pH es el factor que más peso representa frente al valor del pH final, este presenta una interacción directamente proporcional (+) es decir que a mayor pH inicial, mayor será el valor final, sin embargo para la concentración del coagulante se muestra una interacción negativa lo que muestra que a mayor concentración de este el valor del pH disminuye, en este caso las interacciones AA y AB presenta valores significativos e inversamente proporcionales por el contrario BB presenta una interacción directamente proporcional.

El diagrama Pareto para la remoción de color no se incluyó debido a que el valor de R^2 muestra que el modelo propuesto no es válido para esta variable, por lo cual un análisis de esta es irrelevante.



Del diseño realizado se obtiene además el siguiente modelo de regresión de segundo orden para la turbidez (T) con los factores estudiados:

$$T = 54.4091 + 1.52778 \cdot \text{pH} - 0.0592075 \cdot \text{Dosis} - 0.425 \cdot \text{pH}^2 + 0.00222222 \cdot \text{pH} \cdot \text{Dosis} + 0.0000206937 \cdot \text{Dosis}^2$$

Ecuación 9

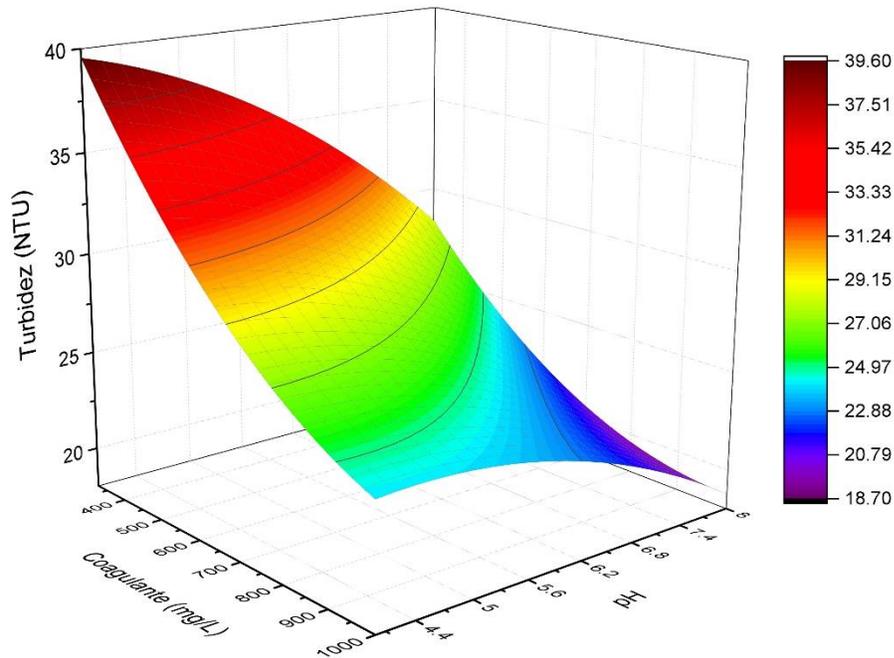


Figura 4. Superficie de respuesta para la coagulación

Se muestra en la **Figura 4** la superficie dada por la **ecuación 9** donde T es dependiente del valor de pH y concentración de coagulante. En esta figura se observa que los valores de turbidez son menores a pH 8 y para las concentraciones de coagulante entre 750 y 1000 mg/L donde la remoción de turbidez se mantuvo constante como también se muestra también en **Tabla 4**, por lo cual se definió la corrida 5 como las mejores condiciones debido a que el costo es 0,54\$/L menor que la corrida 14 donde se obtuvo la misma remoción de color, las condiciones establecidas en la mejor muestra se usaron para realizar nuevamente el ensayo, los resultados obtenidos en esta se muestran en la **Tabla 6** donde se compara con los valores iniciales encontrados.

En la **Tabla 6** se muestra el resultado del agua tratada con la corrida número 5, se obtuvo un agua que disminuyó los sólidos suspendidos, sin embargo a un valor fuera del rango permisible, el pH entró al rango legal debido a que antes del tratamiento se ajustó a un valor superior al que tenía la muestra. El valor de DQO y DBO no presentaron alguna variación importante, pues el color está aportando una alta carga contaminante, debido a que no hubo remoción de color, se define que la disminución de turbidez se debe a material vegetal suspendido.

Tabla 6. Comparación agua inicial y agua coagulada.

Parámetro	Muestra 1	Coagulada	Res 0631
pH	4,46	6,02	6 – 9
Cd (mS/cm)	6,83	7,62	-
Coloración	Morada Intenso	Morada Intenso	-
Turbidez (NTU)	76	20	-
Sólidos Suspendidos (mg/L)	88	38	0,050
Concentración Estimada de colorante (g/L)	30,69	30,5	-
DQO (g/L)	24,56	24,1	0,150
DBO ₅ (g/L)	3,07	2,82	0,050

Adsorción

Se muestran en la **Tabla 7** los resultados de los ensayos de adsorción. La muestra resultante de cada ensayo se empleó para el siguiente experimento. Y se midieron los porcentajes de reducción de las absorbancias en cada ensayo.

Tabla 7. Tabla experimentos adsorción

Ensayo	Dosis de Carbón (g/L)	Abs (630)	% reducción	Abs (562)	% reducción	Abs (420)	% reducción
1	100	157,5	0	502	0	134	0
2	100	142	9,8	434,5	13,4	119	11,2
3	100	125,5	20,3	366,5	26,9	104,5	22,1
4	100	109,5	30,5	299	40,4	89	33,6
5	100	94	40,3	231	53,9	74,5	44,4
6	100	79	49,8	164	67,3	60,5	54,8
7	100	63,5	59,7	98	80,5	46,5	65,3
8	100	49	68,8	33	93,4	32,75	75,5

Se muestra en la **Figura 5**, el costo correspondiente al diferentes porcentajes de remoción según la longitud de onda, donde se puede observar que en la longitud de onda de 562nm se obtuvieron porcentajes de remoción mayores y que el costo a medida que aumentan los porcentajes de disminución de los picos de absorbancia se hace mayor, debido a la cantidad de carbón que se necesitan para alcanzar estos valores. No se analizaron mayores dosis de carbón porque hasta este punto los costos asociados al tratamiento eran demasiado altos.

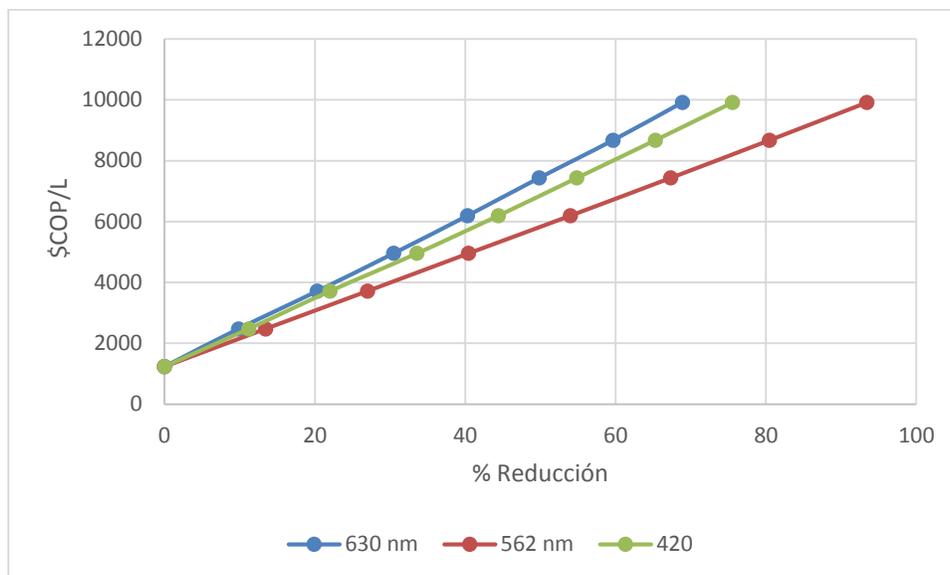


Figura 5. Costo vs % reducción en longitud de onda

En la **Figura 5** se observa además que a medida que la absorbancia (concentración de colorante) disminuye el costo por litro aumenta debido a que se necesita más carbón para lograr remover el colorante. Debido a que se necesita una gran cantidad de adsorbente para lograr un alto porcentaje de remoción la adsorción se convierte en un tratamiento con un costo muy elevado, aunque la experimentación mostró buena remoción (+80%), la inversión económica y de tiempo hacen inviable la idea de establecer este proceso como única etapa para un tratamiento de estas aguas, sin embargo es posible utilizar el carbón activado como una etapa final para un proceso con un tratamiento previo, evitando que la alta concentración de colorante sature el carbón y sea una ayuda para la remoción del resto de contaminantes.

En la **Tabla 8** se muestran los resultados del experimento en donde se logró mayor reducción en el porcentaje de color y se compara con los valores iniciales del agua, en esta se observa una importante disminución en los valores de DQO 86,84%, DBO 83,16% y turbidez 61,36%, no obstante siguen siendo valores muy por encima de la ley.

Tabla 8. Comparación agua inicial vs agua tratada por adsorción

Parámetro	Muestra 1	Tratada	Res 0631
pH	4,46	5,9	6 – 9
Cd (mS/cm)	6,83	1,250	-
Coloración	Morada Intenso	Morada Intenso	-
Turbidez (NTU)	76	38	-
Sólidos Suspendidos (mg/L)	88	34	0,050
DQO (g/L)	24,56	3,23	0,150
DBO₅ (g/L)	3,07	0,517	0,050

Fenton

En la **Tabla 9** se muestran los ensayos realizados y los resultados pertinentes para la remoción de color y el pH, estos valores presentados son el promedio de los resultados del diseño de experimentos y la réplica, si la diferencia de la réplica era mayor al 10% el ensayo se repetía. Es posible observar que el pH de todos los ensayos está por debajo del límite mínimo según la ley, esto se debe a que valor propicio para trabajar este proceso es 3 y la reacción disminuye este valor un poco debido a la formación de ácidos carboxílicos. La remoción de color mostro buenos porcentajes que exponen un buen cambio para el objetivo principal, especialmente en aquellos ensayos donde la concentración del peróxido era la mayor como en la corrida 2 y 9. En esta tabla también se muestra el costo/L a tratar que permite elegir finalmente cuales de las mejores condiciones es ideal según la inversión monetaria respectiva. La remoción de color se calculó en base a una longitud de onda equivalente a 550 nm.

Tabla 9. Experimentos con Fenton

Ensayo	Concentración de Hierro (mM)	Concentración de H ₂ O ₂ (M)	\$COP/L	%RC	pH
1	10	0,7525	229,87	65	2,72
2	8	1,129	339,04	94	2,43
3	6	0,376	115,69	28	2,82
4	8	0,376	117,36	33	2,8
5	8	0,7525	228,20	61	2,73
6	6	1,129	337,37	87	2,62
7	10	0,376	119,03	38	2,84
8	6	0,7525	226,53	52	2,61
9	10	1,129	340,70	97	2,35

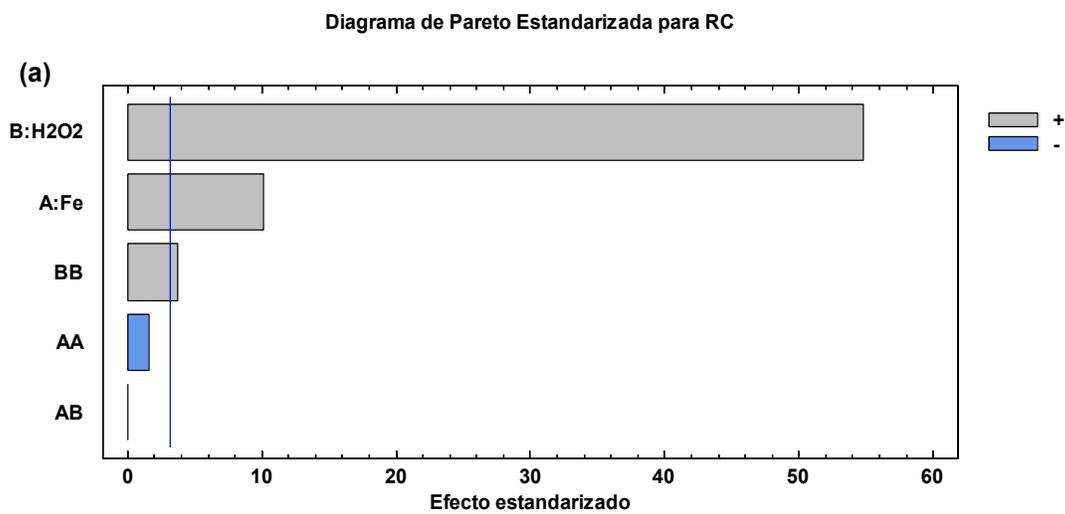
Se muestra en la **Tabla 10**, el valor-p respectivo a las variables de respuesta con las interacciones de segundo respectivas para cada una de estas y el coeficiente R².

Tabla 10. Análisis de varianza para el Fenton

Resumen Análisis de la Varianza ANOVA		
	Valor-P	
Factor	%RC	pH final
A:Fe	0.0021	0.5664
B:H₂O₂	0.0000	0.0166
AA	0.2098	0.9223
AB	1.000	0.2017
BB	0.0340	0.5405
R²	99%	90.07%

Se observa que para el porcentaje de remoción de color la concentración de hierro (A) y de H₂O₂ (B) generan un efecto significativo que se presenta con un color rojo, adicionalmente la interacción BB muestra un valor p significativo también, lo que significa que el término cuadrático de la

concentración de peróxido influye significativamente sobre la remoción. Por otra parte, se obtuvo un modelo con un R^2 del 99% es decir que los datos están muy bien ajustados. En cuanto al pH se tiene que el factor B muestra un valor-p menor a 0,05 como único factor significativo para esta variable, obteniendo esta vez un $R^2= 90,7\%$ obteniendo gran parte de los datos explicados por el modelo.



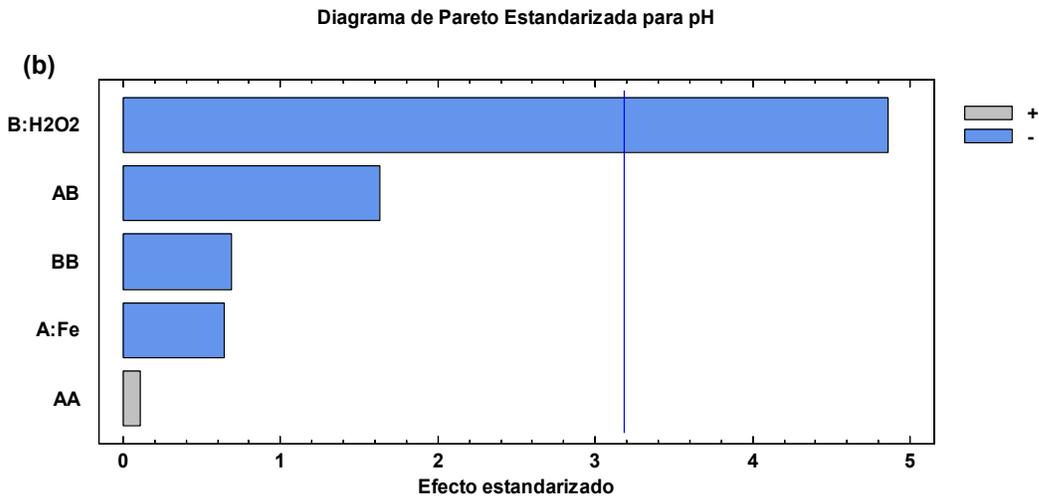


Figura 6. Diagrama Pareto %RC (a), pH (b)

El diagrama Pareto muestra para (a) se muestra que hay una interacción directamente proporcional para la concentración de Fe, H₂O₂ y BB por lo tanto al aumentar la concentración de estos factores la remoción aumenta, para (b) se muestra que sólo el factor B es significativo y que tiene un comportamiento inversamente proporcional con respecto al pH es decir que a mayor concentración de H₂O₂ menor es el valor del pH, este comportamiento también los presentan el factor A, y las interacciones AB y BB. Del modelo anterior se obtuvo la siguiente ecuación:

$$RC = -31.3123 + 8.75*Fe + 42.0787*H_2O_2 - 0.375*Fe^2 + 0.0*Fe*H_2O_2 + 24.691*H_2O_2^2$$

Ecuación 10

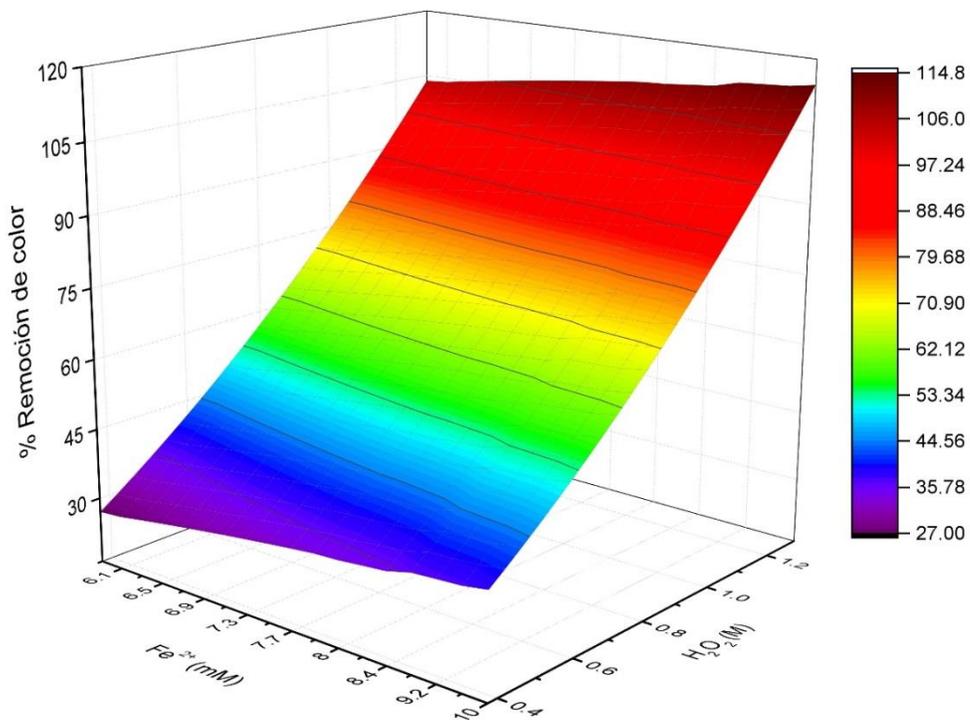


Figura 7. Superficie de respuesta Fenton

En la **Figura 7** se muestra el resultado dado por la **ecuación 10**, donde se dieron diferentes valores para la concentración de hierro y de peróxido para obtener una mejor superficie que mostrara de mejor manera el comportamiento de los resultados obtenidos en el experimento. Es visible en la figura que hay una relación directamente proporcional donde al aumentar las concentraciones de los factores la remoción de color aumenta, se obtiene una remoción mayor al 80% presentado en color rojo y presenta su punto máximo a unos valores de 10mM Fe y 1,2 M H₂O₂.

El ensayo que presento la máxima remoción de color se hizo nuevamente y se evaluó si los valores entraban en el cumplimiento de la norma, se tomó entonces el ensayo 9 y los valores obtenidos finalmente se muestran en la **Tabla 11** y se observa que en relación a la inicial se obtuvo una DQO y DBO menores en un 96,13 y 95,76% respectivamente, además el pH necesita ajustarse antes de alguna descarga y los sólidos suspendidos aumenta por la presencia del hierro.

Tabla 11. Comparación muestra inicial y agua tratada con Fenton

Parámetro	Muestra 1	Tratada	Res 0631
pH	4,46	2,7	6 – 9
Cd (mS/cm)	6,83	6,98	-
Coloración	Morada Intenso	Morada Intenso	-
Turbidez (NTU)	76		-
Sólidos Suspendidos (mg/L)	88	117	50
DQO (g/L)	24,56	0,95	0,150
DBO ₅ (g/L)	3,07	0,13	0,050

Diseño

Se definió el proceso Fenton como el tratamiento que más acerca las características del agua dentro del valor permisible por la ley, además económicamente mejor que los otros propuestos. Se propuso para el diseño de la planta una etapa de oxidación con Fenton seguida de un proceso de adsorción con el fin de cumplir con los límites presentados asegurándose una buena calidad del tratamiento.

La planta se ubica en Rionegro con una temperatura promedio de 17°C, operará con un proceso batch de 9 horas/ día, durante 4 días/mes, tratando 4m³/mes, estos datos en base al volumen producido por una de las empresas con mayores desechos de tinturados; se utiliza energía eléctrica suministrada por EPM para el empleo de las bombas y agitadores presentes. Los volúmenes tratados pueden aumentar según la producción de flores tinturadas, por ende, los días de tratamientos al mes.

En las figuras 9,10 y 11 se muestran los diagramas referentes del proceso. En la **Figura 8** se muestran los insumos necesarios para el tratamiento, donde el carbón activado se muestra como entrada aunque este estará en una torre necesita un cambio en cuanto se sature. En la **Figura 9** se ilustran las operaciones del proceso en una serie de bloques y las cantidades respectivas por insumo con base a

la información donada por una empresa. En la **Figura 10** se muestra el flujo del proceso donde están los equipos y las corrientes presentes en este.

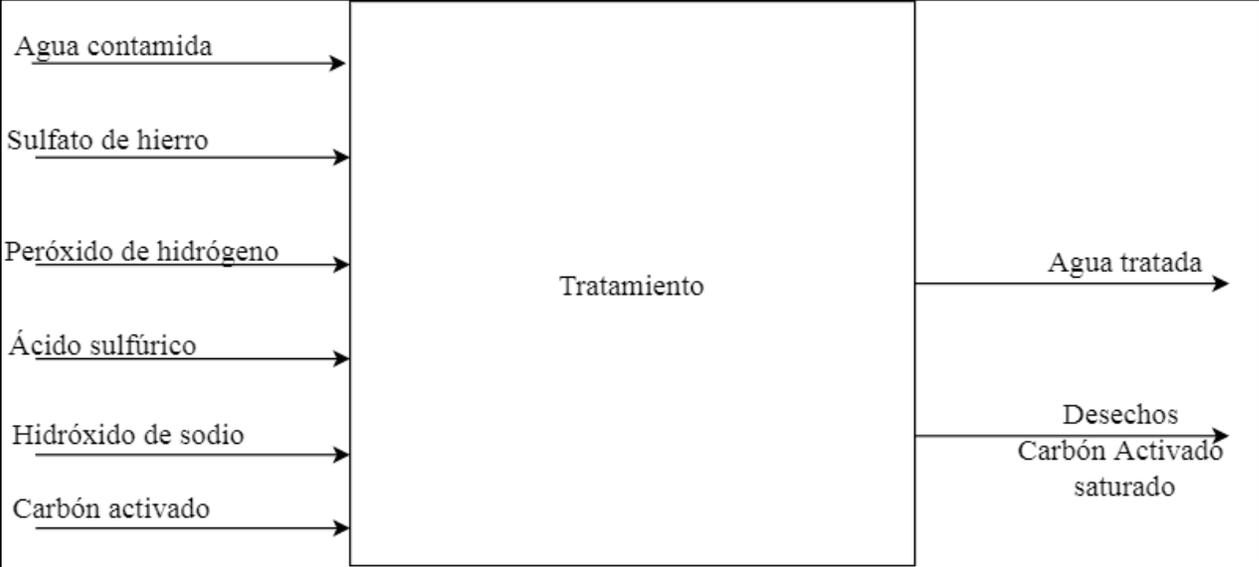


Figura 8. Diagrama de entradas y salidas del tratamiento.

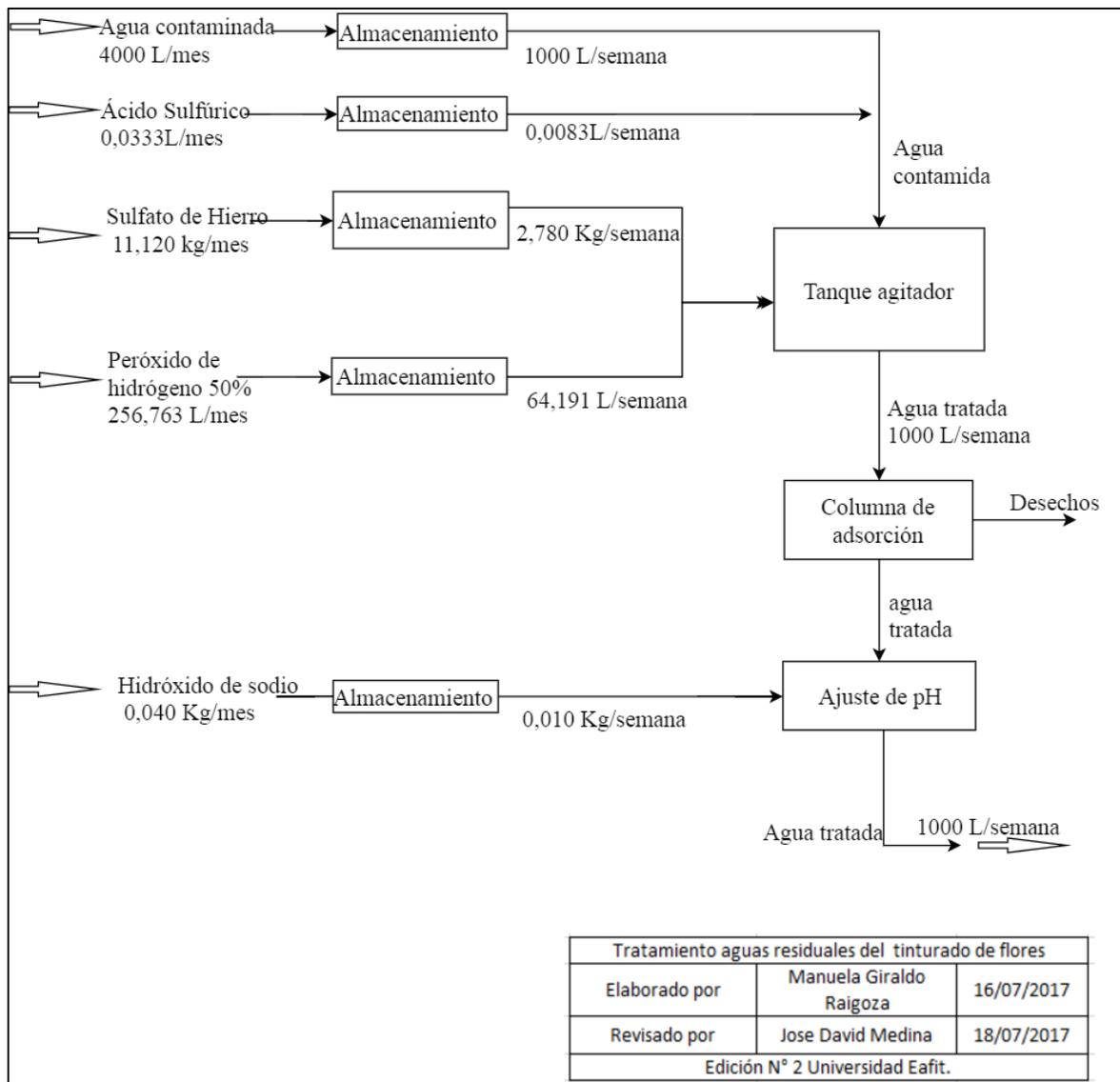


Figura 9. BFD del tratamiento.

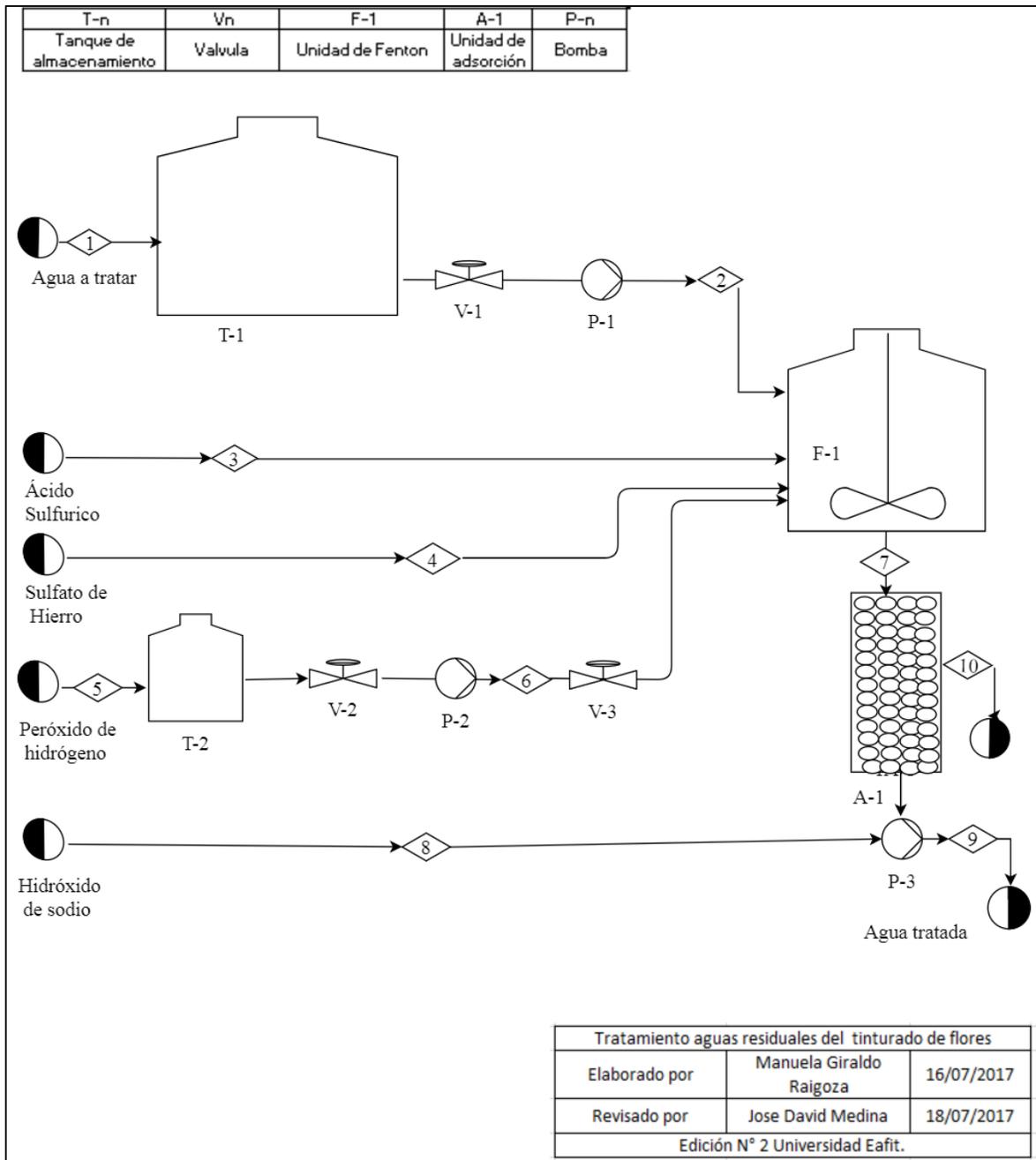


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso

Se especifican los equipos en la **Tabla 12** donde se exponen las características principales, se utilizó para el dimensionamiento de estos las heurísticas de Walas del libro “Chemical process equipment”[20] los cálculos pertinentes se encuentran en el **Anexo 4**, para las dimensiones de la torre de adsorción se usaron las medidas de una presente en una planta de aguas residuales de un cultivo de flores.

Tabla 12. Dimensiones de equipos

Unidad	Características	Material
Bombas (P-1, P-2, P-3)	Potencias: 0,00635, 7,21092*10 ⁻⁵ y 0,008757 kW	-
T-1: Tanque Almacenamiento	Capacidad: 8 m ³ Diámetro:1,5m Altura: 4,5271	Fibra de vidrio
T-2: Tanque almacenamiento H₂O₂	Capacidad: 0,515 m ³ Diámetro:0,7 m Altura:1,3345m	Fibra de vidrio
F-1: Tanque proceso Fenton	Capacidad: 2 m ³ Diámetro:1,25 m Altura:1,6298 m	Fibra de vidrio
A-1: Torre de Adsorción	Potencia agitador: 0,2363 kW Diámetro: 1,8m Altura: 4,5m Volumen:11,451 m ³	Fibra de vidrio

Se debe tener en cuenta que las dimensiones propuestas se deben validar con ensayos posteriores, donde se analice si alguna parte del proceso está fallando o si se está cumpliendo efectivamente con la normatividad ambiental; sin embargo, esto se sale del alcance del proyecto por lo cual no se presentan valores finales.

Análisis de costos

Se muestra a continuación los flujos de caja de las 2 opciones a seguir en la **Tabla 13** (N periodo de años), y el análisis pertinente para escoger cuál era mejor, los supuestos usados se encuentran en el **Anexo 4**. El costo de energía se tomó de un informe presentado por EPM [21]. Se incluyó un costo anual de \$1'000.000 COP anuales con un crecimiento del 10% por año por la disposición del carbón activado.

Tabla 13. Flujos de caja

Periodo	FC A	FC B	FC A-B	FCB-A
0	\$ (10.000.000,00)	\$ -	\$ (10.000.000,00)	\$ 10.000.000,00
1	\$ (23.292.525,66)	\$ (31.200.000,00)	\$ 7.907.474,34	\$ (7.907.474,34)
2	\$ (26.138.200,44)	\$ (35.919.312,00)	\$ 9.781.111,56	\$ (9.781.111,56)
3	\$ (21.050.615,11)	\$ (41.352.467,13)	\$ 20.301.852,02	\$ (20.301.852,02)
4	\$ (43.143.342,93)	\$ (47.607.441,31)	\$ 4.464.098,38	\$ (4.464.098,38)
5	\$ (25.434.548,26)	\$ (54.808.542,88)	\$ 29.373.994,62	\$ (29.373.994,62)
6	\$ (30.040.284,18)	\$ (63.098.883,08)	\$ 33.058.598,90	\$ (33.058.598,90)
7	\$ (30.785.453,15)	\$ (72.643.220,14)	\$ 41.857.766,99	\$ (41.857.766,99)
8	\$ (35.793.998,49)	\$ (83.631.233,61)	\$ 47.837.235,13	\$ (47.837.235,13)
9	\$ (37.092.257,82)	\$ (96.281.294,01)	\$ 59.189.036,19	\$ (59.189.036,19)
10	\$ (42.709.202,77)	\$ (110.844.802,54)	\$ 68.135.599,77	\$ (68.135.599,77)

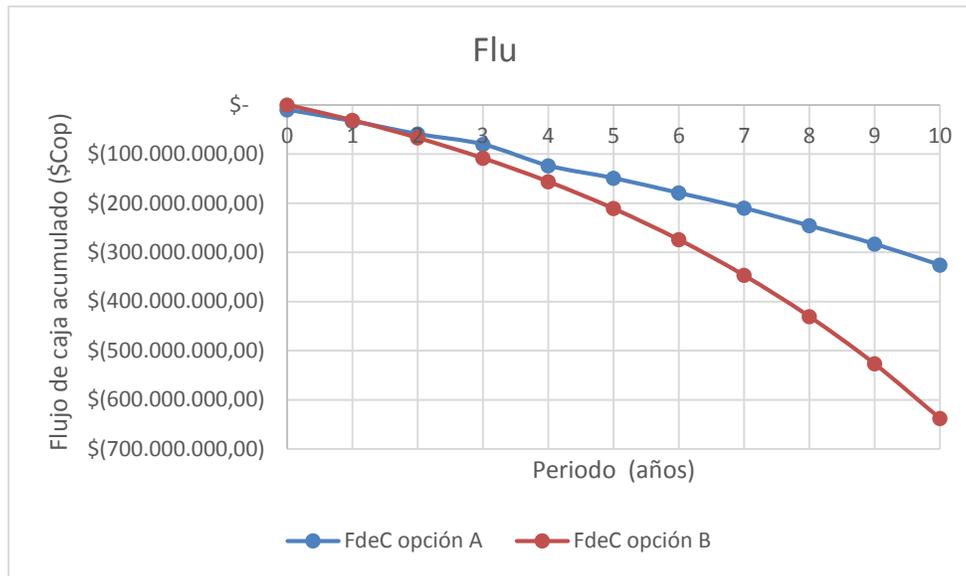


Figura 11. Flujos de caja

En la **Figura 11**, se muestran los flujos de caja obtenidos por los proyectos propuestos, donde A es el proyecto que se propone de implementación de planta de tratamiento y B como el proceso actual. Donde se muestra que los costos para la opción A, en un periodo de 10 años representa un ahorro monetario importante, sin embargo es importante aclarar que es posible que esta propuesta no sea válida y necesite de otro proceso adicional que haga que los costos sean mayores, por lo cual es necesario experimentar la propuesta completa a nivel de laboratorio primero, sin embargo se salía del alcance del proyecto.

En la **Tabla 14** y **Tabla 15** se muestran los resultados de un análisis del VPN de cada proyecto, donde se muestran con valores negativos debido a que son proyectos de egresos, por este criterio se escoge el valor menos negativo, siendo entonces el proyecto A el seleccionado, sin embargo al ser proyectos mutuamente excluyentes fue necesario hacer un análisis de la TIRI por lo cual se realizaron las restas de los flujos de caja y se busca nuevamente el VPN de esto; se observa que A-B presenta un valor positivo, lo que significa que el proyecto A sobre el B es mejor a la tasa requerida por el inversionista; por otra parte se ejecutó un análisis de sensibilidad mostrado en la **Tabla 15** el cual nos confirma que el proyecto A es mejor que el proyecto B, sin embargo hay un punto en el que este comportamiento se invierte y es cuando la tasa interna de oportunidad que se exige es mayor al 130%.

Tabla 14. Comparación Financiera de los proyectos

Variables Financieras	
TIO	20%
VPN A	(\$ 109.862.290,02)
VPN B	(\$ 217.276.996,30)
VPN A-B	\$ 71.201.873,57
VPN B-A	(\$ 71.201.873,57)
TIR	110%

Tabla 15. Análisis de sensibilidad

TIO	VPN A-B	VPN B-A
20%	\$ 71.201.873,57	(\$ 71.201.873,57)
30,00%	\$ 38.840.962,47	(\$ 38.840.962,47)
40,00%	\$ 22.488.572,32	(\$ 22.488.572,32)
50,00%	\$ 13.549.336,74	(\$ 13.549.336,74)
60,00%	\$ 8.329.053,18	(\$ 8.329.053,18)
70,00%	\$ 5.108.239,41	(\$ 5.108.239,41)
80,00%	\$ 3.028.770,94	(\$ 3.028.770,94)
90,00%	\$ 1.635.367,70	(\$ 1.635.367,70)
100,00%	\$ 673.125,46	(\$ 673.125,46)
110,00%	(\$ 7.592,27)	\$ 7.592,27
120,00%	(\$ 498.362,66)	\$ 498.362,66
130,00%	(\$ 857.321,82)	\$ 857.321,82
140,00%	(\$ 1.122.584,60)	\$ 1.122.584,60
150,00%	(\$ 1.319.857,71)	\$ 1.319.857,71
160,00%	(\$ 1.466.916,85)	\$ 1.466.916,85
170,00%	(\$ 1.576.326,55)	\$ 1.576.326,55
180,00%	(\$ 1.657.141,70)	\$ 1.657.141,70

Con estos resultados expuestos es posible ver que el proceso planteado puede funcionar bien a un menor costo que la tercerización, sin embargo es importante aclarar que no se incluyó la automatización de la planta pues inicialmente se propone como un proceso manual debido a los bajos volúmenes, al momento de estos aumentarse se hace necesario una automatización que permita un trabajo más independiente de personal de supervisión y estos sistemas de control aumentaría los costos de inversión, que no es posible definir en el alcance del proyecto si hace inviable o no la idea de trabajar con una planta propia.

Conclusiones

De acuerdo a los experimentos realizados es posible concluir que el proceso de coagulación es un proceso que no sirve para la remoción de los colorantes del tinturado de flores, la reducción máxima que se obtuvo fue del 0%; a causa de la alta solubilidad y los bajos niveles de turbidez que estos poseen, por lo que incluir una etapa preliminar para tratamientos avanzados de este, provocaría que las aguas posean más carga de sales y se acidifiquen más, adicionalmente sería un gasto innecesario tanto monetario como de espacio.

El proceso de adsorción logra una disminución importante en el color presente en las aguas donde los porcentajes de reducción de las longitudes de onda estuvieron entre un 60 y 90%, causando una deducción en la DQO (86,9%), a pesar de esto la cantidad que se necesita para lograr resultados deseables, hace que económicamente el proceso sea inviable pues para lograr estos porcentajes el costo por litro se encontró alrededor de los \$10.000 (sin tener en cuenta la disposición del carbón cuando cumpla su función es decir este saturado), como proceso único de tratamiento no es efectivo razón por la cual se propone el proceso como una etapa secundaria o complementaria de un proceso más eficiente.

Según el diseño de experimentos con Fenton se define este como el mejor de los procesos evaluados donde se consiguió una reducción de 96,1 y 95,8% para reducción DQO y DBO respectivamente, aun siendo unos porcentajes bastante altos, el cumplimiento de la ley no se logró a cabalidad, es decir en caso de realizar una descarga de estas aguas se tendría multas ambientales; por esto se concluye que la implementación de este proyecto es inviable técnicamente y se propone evaluar otras opciones como Fotofenton con luz UV solar que permita una reacción más acelerada y no aumenten los costos energéticos del tratamiento y por ende el costo final de este, además de otros métodos avanzados como por ejemplo ozono/Fenton. Los factores de estudio de concentración de peróxido de hidrogeno y de hierro en el Fenton indicaron tener una relación directa con las variables de respuesta, la eficiencia y el costo del tratamiento siendo la concentración de peróxido la de mayor incidencia a causa de los hidroxilos generados, las condiciones óptimas de operación para los porcentajes mencionados anteriormente fueron concentración de hierro 10mM y de peróxido 1,129M con un pH fijado en 3. Se plantea además la posibilidad de estudiar estos procesos con variación de la temperatura de reacción y ver si esta variable guía a mejores resultados y disminuciones en el tiempo de reacción.

Del diseño conceptual y el análisis económico presentado se define el proceso Fenton + adsorción como una alternativa viable económicamente, pues la inversión que se presenta para este tratamiento es menor a la inversión que presenta un tratamiento tercerizado, mostrando un costo aproximado de 490\$/L en contra de 650\$/L, respectivamente, sin embargo el primer costo requiere de un análisis de sensibilización que muestre en qué punto se haría inviable económicamente este proceso, por ejemplo en el aumento de los costos de los reactivos y equipos correspondientes.

Es importante tener más de un tratamiento para aguas residuales especialmente para aguas difíciles de tratar como en el caso estudiado, es por esto que un solo proceso no da abasto con la remoción de colorantes y cumplimiento de la norma.

Se identifica que el tratamiento de estas aguas es mucho más costoso pues un metro cúbico de un agua residual de empresas que trabajan con colorantes textiles tiene un costo promedio para reactivos por lo general de 6000\$/ m³ mientras que el costo de las aguas del tinturados de flores con el proceso propuesto tendrían un costo de reactivos y disposición de desechos equivalente a 490.000\$/m³ por esto se identifica la necesidad de buscar más alternativas de tratamiento y realizar nuevas experimentaciones. Por otra parte, se hace necesario que el uso de los tinturados en las empresas tenga un mayor estándar para evitar la contaminación excesiva de las aguas a causa de la sobredosis de colorante, facilitando así el proceso del tratamiento de las aguas residuales.

Tabla 16. Documentos adicionales del Proyecto de

Nombre	Desarrollo	Tipo de Archivo	Enlace Google drive
Anexo 2. Resolución 631 de 2015	Terceros	PDF	https://drive.google.com/open?id=0B-G8ukvwDQq0RDhWdmxoOGhZNMW
Anexo 3. Regiones productivas de flores	Terceros	Imagen	https://drive.google.com/open?id=0B-G8ukvwDQq0SnZiBlNtalglSGc
Anexo 4. Ficha técnica carbón activado granular	Terceros	PDF	https://drive.google.com/open?id=0B-G8ukvwDQq0eXMwbGJMTGR4bWhBTv11c0Z0Y2hPZnVQYXJz
Anexo 4. Calculo dimensionami	Propios	PDF	https://drive.google.com/open?id=0B-G8ukvwDQq0Skx1UmRNR21XTIU

Referencias

- [1] Colombian Ministry of Agriculture and Rural Development; Asocolflores, “Well Being for a Million Colombians,” in *COLOMBIAN GROWN. The dazzling magic of colombian flowers*, Fifth edit., Diseño Editorial Libros y Revistas; Asocolflores, 2015, pp. 8–11.
- [2] Asocolflores, “Economía&Mercados,” *Flor y cultura colombiana. Revista de la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores*, vol. 6, pp. 14–19, 2015.
- [3] Asocolflores, “Boletín Estadístico 2015,” p. 35, 2015.
- [4] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Presentación Resolución 0631 de 2015,” *17 Marzo*, p. 62, 2015.
- [5] L. Giraldo and A. Restrepo, “Evaluación de la fotodegradación sensibilizada con TiO₂ Y Fe³⁺ para aguas coloreadas,” *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 1, no. 2, pp. 54–60, 2004.
- [6] E. G. Pavas and M. Á. Gómez-García, “Multifactorial optimization of the decolorisation parameters of wastewaters resulting from dyeing flowers,” *Water Sci. Technol.*, vol. 59, no. 7, pp. 1361–1369, 2009.
- [7] L. Fernando and G. Giraldo, “Degradación y mineralización de un colorante en aguas residuales , analizado desde las superficies de respuesta *,” *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 7, no. 2, pp. 113–124, 2010.
- [8] L. Fernando, G. Giraldo, M. Lucía, and H. Ángel, “Comparación de los tratamientos con TiO₂ y FeCl₃ para aguas residuales coloreadas textiles *,” vol. 3, no. 2, pp. 25–33, 2007.
- [9] B. Shi, G. Li, D. Wang, C. Feng, and H. Tang, “Removal of direct dyes by coagulation: The performance of preformed polymeric aluminum species,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 143, no. 1–2, pp. 567–574, 2007.
- [10] T. H. Kim, C. Park, J. Yang, and S. Kim, “Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and Fenton oxidation,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 112, no. 1–2, pp. 95–103, 2004.
- [11] APHA/AWWA/WEF, “Standard methods for the examination of water and wastewater,” *Stand. Methods*, p. 541, 2012.
- [12] N. Técnica, J. E. N. L. A. Coagulación-floculación, and D. E. L. Agua, “NTC,” 2001.
- [13] M. S. Lucas and J. A. Peres, “Removal of COD from olive mill wastewater by Fenton’s reagent: Kinetic study,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 168, no. 2–3, pp. 1253–1259, 2009.
- [14] G. Pliego, J. A. Zazo, J. A. Casas, and J. J. Rodriguez, “Case study of the application of Fenton process to highly polluted wastewater from power plant,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 252–253, pp. 180–185, 2013.
- [15] F. R. Spellman, *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*, Second. Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- [16] C. Y. Yin, “Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment,” *Process Biochemistry*. 2010.
- [17] N. Bidhendi, G.R. Nabi; Torabian, A.; Ehsani, H.; Razmkhah, “Evaluation of industrial dyeing wastewater treatment with coagulants and polyelectrolyte as a coagulant aid,” *Iran. J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 29–36, 2007.
- [18] P. J. Oberholster, J. G. Myburgh, P. J. Ashton, J. J. Coetzee, and A. M. Botha, “Bioaccumulation of aluminum and iron in the food chain of Lake Loskop, South Africa,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 75, no. 1, pp. 134–141, 2012.
- [19] C. Namasivayam and D. Kavitha, “Removal of Congo Red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste,” *Dye. Pigment.*, vol. 54, no. 1, pp. 47–58, 2002.
- [20] S. M. Walas, *Chemical process equipment: selection and design*. 2002.

[21] E. P. de Medellín, “Tarifas y Costo de Energía Eléctrica - Mercado Regulado,” 2017.