

## TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

G. Salas Colotta

Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos  
e-mail: gsalas@viabcp.com

**Resumen:** Se presentan los resultados de un estudio de tratamiento físico-químico de aguas residuales de las industrias textiles, documentando la influencia de concentraciones de reactivos usados y de las variaciones de condiciones de tratamiento para obtener condiciones óptimas de operación. Los rendimientos obtenidos son el 70% en la remoción de DQO y DBO<sub>5</sub> y el 80% para la remoción de tinte.

**Palabras claves:** Tratamiento de aguas residuales, coagulación, flotación, descontaminación.

**Abstract:** A rapid and highly efficient treatment process for waste waters containing dye was investigated by combining the process of chemical coagulation / flocculation. About 70% of DQO, DBO<sub>5</sub> and 80% of dyes was removed simultaneously.

**Key words:** Waste water treatment, coagulation, dissolved air flotation.

### I. INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales industriales de la industria textil han llegado a ser en muchos lugares un problema que iguala o supera al de las aguas negras domésticas. Su descarga al sistema de alcantarillado de la ciudad está limitada, sin previo tratamiento, ya que los residuos contaminantes y tóxicos contenidos en ella dañan la vida acuática del ecosistema marino, donde son finalmente descargadas. Esta industria está obligada a tratar los efluentes o aguas residuales parcial o completamente en su fuente. Por ello, este trabajo tiene como principal objetivo, a través de pruebas de laboratorio y en planta piloto, la obtención de agua tratada, libre de color producido por el linte, agentes orgánicos disueltos y sales inorgánicas disueltas, de tal forma que el agua tratada pueda ser reutilizada nuevamente en el proceso productivo. La industria textil, en general, es una de las industrias que tiene consumos altos de agua ya que una gran parte del proceso productivo es en húmedo. La generación de

efluentes se realiza en forma intermitente porque el proceso en estudio es por lotes (batch). Como consecuencia de las operaciones húmedas en una planta textil, el agua residual presenta características particulares como: almidones, dextrinas, gomas, glucosa, ceras, pectinas, alcoholes, ácidos grasos, ácido acético, jabones, detergentes, hidróxido de sodio, carbonatos, sulfuros, cloruros, colorantes y pigmentos, peróxidos etc., el pH varía entre 5 y 10, y predomina el color del colorante usado.

El tratamiento físico-químico propuesto para la descontaminación de las aguas residuales de una textil es eficaz desde el punto de vista industrial, dado que: a) el efluente líquido a tratar contiene material contaminante (tinte) como material insoluble o insolubilizable químicamente, en forma dispersa o coloidal, por lo que puede ser coagulado y floculado, b) no reacciona con los reactivos (usados en la coagulación/floculación), solubilizando a éstos (efecto quelante o acomplejante sobre los coagulantes usados para el tratamiento de

aguas), c) se dispone de un sistema de separación sólido-líquido adecuado y efectivo a nivel industrial como lo es la flotación por aire disuelto, d) se eliminan los contaminantes en forma de sólidos orgánicos e inorgánicos disueltos, usando tecnología de membranas u ósmosis inversa.

## II. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

El proceso textil comprende tres fases: a) hilatura, b) tejeduría y c) acabados. Las transformaciones de fibra en hilo y de hilo en tejido son esencialmente operaciones en seco. Los efluentes industriales se generan principalmente en el proceso de acabados, éste se define como cualquier proceso realizado sobre el hilo o tejido para cambiar la apariencia (lo que se ve), el tacto (lo que se siente) y su comportamiento. Siendo el proceso de acabados el responsable de los desechos o efluentes líquidos, detallamos la naturaleza de los acabados en húmedo, que generan efluentes contaminantes: a) descrude: dentro de la máquina la tela es bañada con agua a altas temperaturas y mezclada con soda cáustica. La finalidad de este proceso es eliminar las grasas, aceites, pigmentos naturales, suciedad que pueda contener la tela y la parafina (engomado de las tejedoras). Luego del descrude, la tela pasa a ser blanqueada o teñida, b) teñido: se realiza en las mismas máquinas de descrude. La operación se realiza en medio acuoso. Los teñidos utilizados son de dos tipos: teñido con colorantes directos con fijador que se impregna en la tela y con colorantes reactivos, que son colorantes que reaccionan con la tela y forman un enlace químico en condiciones especiales de pH, c) blanqueo: se realiza cuando se requiere alto grado de blanco, ya sea para posterior teñido con colores claros o para blanqueo óptico. Dependiendo del grado de blanco que se requiera, el blanqueo puede realizarse con cloro o bien con agua oxigenada, d) exprimiendo los rollos de tela: luego de ser teñidos se descargan en coches de acero y se llevan a una máquina hidroextractora para retirar la humedad. Estos procesos necesitan agua tratada (agua blanda: sin iones Ca y Mg,

sin presencia de Al, Fe y Mn), por lo que el agua extraída de los pozos tendrá un tratamiento destinado a la eliminación de las impurezas del agua fuente, a través de resinas de intercambio iónico, base sodio (ablandamiento del agua).

Existen dos tipos de efluentes en una textil, industriales y domésticos, siendo los primeros casi el 99% en volumen. El tratamiento propuesto es para los efluentes industriales. La generación de efluentes industriales se realiza en forma intermitente debido a que los procesos son por lote (batch). Los efluentes industriales se generan principalmente en el proceso de acabados, que comprende el descrude, blanqueo y teñido. En estas etapas se agregan una serie de insumos químicos, tales como tintes, detergentes, agentes estabilizantes, agentes humectantes, dispersantes y penetrantes, sales inorgánicas como soda cáustica, sal textil, peróxido de hidrógeno, ácido acético, etc., los cuales son, en su mayor parte, lavados y retirados con el efluente.

## III. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DESCONTAMINACIÓN

El grado de tratamiento requerido para un agua industrial depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente. El tratamiento primario se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por límites, tanto de descarga al medio receptor (alcantarilla) como para poder llevar los efluentes a un tratamiento terciario (osmosis inversa) para su reutilización en la planta. En esta primera parte, se estudio experimentalmente el pretratamiento, es decir, la coagulación y floculación.

### 3.1 Coagulación / floculación

El tinte no fijado en la tela y removido por el agua en el efluente son partículas coloidales de gran volumen y poco peso con especiales propiedades superficiales y cargadas eléctricamente. Se caracterizan por su gran estabilidad, que impide que se junten, pudien-

do mantenerse indefinidamente en el seno del líquido que los contiene. Esta estabilidad es debida a que la energía cinética que poseen es menor que la energía potencial resultante de la repulsión electrostática y fuerzas de Van der Waals entre partículas. Ya que, esto impide el choque de las partículas de linte y que formen así masas mayores, llamados flóculos, las partículas no se asientan. La coagulación desestabiliza estos coloides, al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados. Esto se logra por lo general añadiendo coagulantes químicos y aplicando energía de mezclado. Las sustancias químicas cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores de baja densidad que pueden ser separados por flotación con aire disuelto. El proceso de desestabilización es la coagulación (neutralización de la carga); la etapa de formación de flóculos es la floculación. Los términos coagulación y floculación son con frecuencia intercambiados; sin embargo, cuando se les considera como dos mecanismos distintos pueden conducir a un mejor entendimiento de la clarificación del agua.

### **Productos químicos coagulantes y floculantes**

Históricamente, los coagulantes metálicos (sales de aluminio y hierro) han sido los más empleados en la clarificación del agua. Estos productos actúan como coagulantes y floculantes. Son muy sensibles al pH y a la alcalinidad. Si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre y pueden solubilizarse el hierro o el aluminio y generar problemas al usuario del agua. Alternativamente se pueden usar polielectrolitos que son moléculas orgánicas solubles en agua. Estas moléculas reaccionan con el material coloidal en el agua, neutralizando la carga (coagulación) o enlazando partículas individuales (floculación) para formar un precipitado visible e insoluble, esto es un flóculo. Dependiendo de su carga los polielectrolitos pueden ser no iónicos, aniónicos o catiónicos.

### **3.3 Flotación por aire disuelto**

Un método alternativo al espesamiento por gravedad es el espesamiento por flotación. De ordinario, este método es más efectivo que el espesamiento por gravedad cuando la gravedad específica del sólido (tinte) coagulado y floculado, como es el caso en estudio, es cercana o menor a la del líquido del cual deben ser separados. La flotación por aire disuelto está basada en el hecho de que si generamos microburbujas de tamaños que fluctúan entre 10 a 100 micras de diámetro, éstas se adhieren a los sólidos, aumentando la flotabilidad de las partículas, haciendo que se eleven a la superficie y se separen.

### **3.4 Desecamiento de los lodos**

El desecamiento de los lodos es por lo común el último paso en la separación de los sólidos, obtenidos como flotado en la etapa de flotación. La meta es producir una torta de una densidad y resistencia tales, que permitan el transporte a un sitio de disposición final como desecho sólido. El filtro usado fue por presión de bandas

### **3.5 Osmosis inversa**

El agua clarificada por flotación es filtrada (filtro de lecho profundo más filtro de carbón activado), y luego osmolizada, a efectos de poder ser reusada. En la osmosis inversa (OI), una fuerza impulsora, la presión diferencial a través de la membrana hace que el agua fluya de una solución más fuerte a la más débil. En la ósmosis inversa, el transporte de agua a través de la membrana no es el resultado del flujo a través de poros definidos, por lo menos no es a través de poros como se les concibe de ordinario. Es el resultado de la difusión, una molécula a la vez, a través de vacantes en la estructura molecular del material de la membrana, por esta razón se le conoce como también «tamiz molecular».

## **IV. CARACTERIZACIÓN DEL VERTIDO**

Los vertidos líquidos de una industria textil poseen una fuerte variabilidad horaria en fun-

ción de los procesos productivos, que se alternan con teñido, enjuague. Por otro lado, contienen cargas orgánicas significativas con presencia de pelusa, tintes, reactivos químicos disueltos, oscilaciones de pH y de temperatura. En las figuras N.º 1 y N.º 2 se presentan gráficamente las oscilaciones de estos parámetros tomadas en una importante textil.

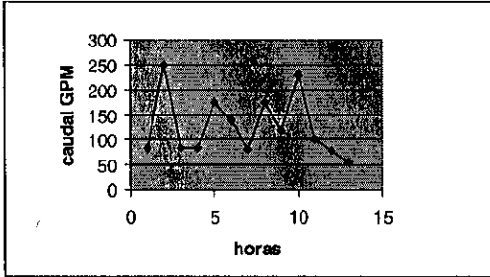


Figura N.º 1. Evolución horaria del caudal

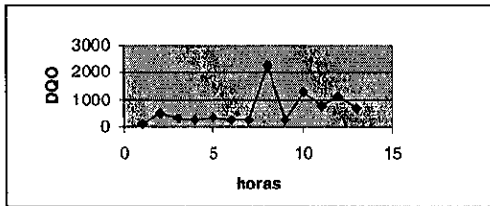


Figura N.º 2a. Evolución horaria SST

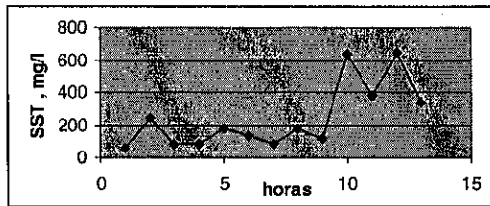


Figura N.º 2b. Evolución horaria SST

Es interesante la correlación obtenida en la textil objeto del estudio, entre la DQO y el contenido de sólidos en suspensión totales (SST). Este hecho, unido a las características analíticas del agua tratada exenta de sólidos (cuyo perfil se obtuvo mediante coagulación/floculación con sales de aluminio y filtración a través de  $0,45 \mu\text{m}$ ), muestran la idoneidad del tratamiento físico-químico como tratamiento primario. Permiten incluso reducir la contaminación a límites compatibles con

el vertido al colector de la alcantarilla de SEDAPAL (sólidos sedimentables,  $8\text{mL/L/h}$  de, temperatura,  $35^\circ\text{C}$ ,  $5,5 < \text{pH} < 8,5$ , aceites y grasas  $100 \text{mg/l}$ , demanda bioquímica de oxígeno,  $\text{DBO}_5$ ,  $1000 \text{mg/L}$ ).

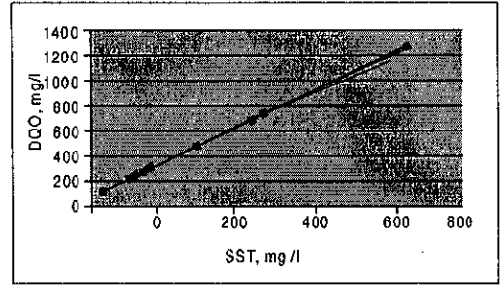


Figura N.º 3. Correlación SST vs DQO

## V. TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO DEL VERTIDO

Debido a las cargas orgánicas que contienen estos vertidos y a la marcada flotabilidad del material coloidal (tintes) y disperso, se optó por un proceso de coagulación-floculación mediante una sal de aluminio (sulfato de alumina) y polímeros orgánicos (PA, polímero aniónico y PC, polímero catiónico), para obtener una buena separación de los tintes por flotación con aire disuelto

El perfil analítico del agua residual bruta a tratar (muestra obtenida mediante alicuotas de los vertidos muestreados) se indica en la Tabla 1.

Tabla N.º 1. Análisis del agua bruta a tratar (valores promedio)

Parámetro	Unidad	Valor
pH	Unid. pH	5-10
DQO total	mg/l	1100
DBP5 total	mg/l	270
SST	mg/l	500
Aceites y grasas	mg/l	100

En lo que respecta a los polímeros orgánicos estudiados se han usado productos industriales, indicados en la Tabla N.º 2.

Tabla N.º 2. Polímeros usados para juntar las partículas coloidales

**- Polímeros aniónicos:**

Denominación	Tipo de polímero	Carga	Peso molecular
Flocudex AS/10	Copolímero Acrilamida-acrilato	Aniónica media	Medio
Flocudex AS/8	Copolímero Acrilamida-acrilato	Ligeramente aniónico	Bajo
Flocudex AM/1	Copolímero Acrilamida-acrilato	aniónica media	Alto
<b>- Polímeros catiónicos:</b>			
Denominación	Tipo de polímero	Carga	Peso molecular
Flocudex CS/45	Poliacrilamida Catiónica	Ligeramente catiónico	Medio
Flocudex CN/78	Poliacrilamida Catiónica	catiónica alta	Alto
Flocudex CM/80	Poliacrilamida Catiónica	catiónica alta	Alto

Se efectuaron pruebas de «jar test» sobre volumen de un litro de muestra, añadiendo los reactivos coagulante y/o floculante y manteniendo el producto de la reacción decantando durante 30 minutos en cono Imhoff, tras los cuales se procedió al análisis de la fase líquida. Como parámetros de control se analizó la DQO (mg/L) y el contenido de sólidos en suspensión totales (mg/L).

**5.1 Influencia de la naturaleza química del polímero**

Condiciones de operación: [sulfato de alúmina]= 200 mg / L; [polielectrolito]= 3 mg/L; volumen de reacción= 1 L; decantación, 30 min.; pH regulado a 7; temperatura = 30°C,

a) Los resultados del tratamiento con polímeros aniónicos se indican en Tabla N.º 3.

Se observa que la utilización del polímero aniónico de alto peso molecular dificulta la floculación. El polímero se hace más eficaz al disminuir el peso molecular y presenta una carga aniónica media.

b) Los resultados del tratamiento con polímeros catiónicos se indican en la Tabla 4.

Se observa que los polímeros catiónicos se muestran ineficaces en este tratamiento. Esto es debido a la interacción con el coagulante (sulfato de alúmina), que origina un aumento de la densidad de carga positiva en el medio y dificulta la floculación. Se descarta el uso de estos compuestos.

Tabla N.º 3. Resultados obtenidos después de agregar polímeros aniónicos

Polímero aniónico	Volumen del material decantado	Volumen del material flotado	DQO fase libre	SST fase libre	Aspecto fase libre
AM/1	200 ml	0 ml	426	380	turbia
AS/8	15 ml	200 ml	382	50	limpia
AS/10	8 ml	200 ml	412	39	más limpia

**Tabla N.º 4.** Resultados obtenidos después de agregar polímeros catiónicos

Polímero caiónico	Volumen del material decantado	Volumen del material flotado	DQO fase libre	SST fase libre	Aspecto fase libre
CS/45	110 ml	0 ml	993	430	Turbia poca separación
CM73		no hay separación			
CM80		no hay separación			

### 5.2 Influencia de la concentración del sulfato de alúmina

Condiciones de reacción: [polímero aniónico FlócuDex AS/10]= 5 mg/l, copolímero aniónico acrilamida-acrilato de peso molecular medio y carga aniónica media; volumen de reacción =1 litro; decantación, 30 minutos; el pH regulado a 7; temperatura = 30°C. Los resultados se muestran en la Tabla N.º 5.

aniónico FlócuDex AS/10 ], copolímero aniónico acrilamida-acrilato de peso molecular medio y carga aniónica media; volumen de reacción = 1 litro; decantación, 30 minutos; el pH regulado a 7; temperatura = 30°C.

Los resultados se muestran en la Tabla N.º 6.

Se observa que:

**Tabla N.º 5.** Resultados obtenidos después del tratamiento con una sal inorgánica

Alúmina (mg/l)	Aspecto del flóculo	Volumen del material decantado (ml)	Volumen del material flotado (ml)	DQO fase libre (mg/l)	SST fase libre	Aspecto fase libre
0 (agua bruta)	---		---	1100	500	---
50	ligero particulado	38	---	448	263	turbia
100	flóculo no uniforme	42	50	362	172	menos turbia
150	flóculo compacto	56	70	328	59	menos limpia
200	flóculo mejorado	110	200	323	30	más limpia
300	flóculo mejorado	125	100	316	24	más limpia

Se observa que al aumentar la concentración de aluminio disminuye la DQO y los SST, aunque por encima de 150 mg/l de dosificación del coagulante, la mejora no es significativa.

### 5.3 Influencia de la concentración del polímero aniónico

Condiciones de reacción: [sulfato de alúmina] = 150 mg/l ; tipo de polímero = [polímero

- La variación del polímero es más eficaz que la variación/aumento de la sal inorgánica.
- Al aumentar la dosificación del polímero, mejora la flotabilidad de los sólidos separados.
- Altas dosificaciones de polímeros permiten un rendimiento en la disminución de la DQO de un 90% y de sólidos (tinte) de un 73% a nivel de jar-test.
- En dosificaciones medias, económicamente compatibles con la explotación de

una planta industrial (5 mg/l de polímero + 150 mg / l de sulfato de alúmina), se obtienen rendimientos superiores al 70% en DQO y SST.

Se observa que es una característica del catión aluminio es generar hidróxidos anfóteros fuertemente dependientes de las variaciones del pH

**Tabla N.º 6.** Resultados obtenidos después del tratamiento con polímeros

Polímero (mg/l)	Volumen del material decantado (ml)	Volumen del material flotado (ml)	DQO fase libre (mg/l)	SST fase libre (mg/l)	Aspecto fase libre
0 (agua bruta)	----	----	1000	500	---
2	20	40	485	250	turbia
5	40	80	269	159	limpia
10	40	100	250	159	limpia
15	20	120	98	136	más limpia
20	20	120	107	136	más limpia

#### 5.4 Influencia del pH

Condiciones de reacción: [sulfato de alúmina] = 150 mg / l; Floccudex AS/10 = 5 mg/l, copolímero aniónico acrilamida-acrilato de peso molecular medio y carga aniónica media; volumen de reacción = 1 litro; decantación, 30 minutos; el pH regulado a 7; temperatura = 30°C. Los resultados se muestran en la Tabla N.º 7.

**Tabla N.º 7.** Resultados obtenidos en función del pH

pH	Aspectos fase libre	DQO fase libre	SST fase libre
5,0	Turbia	877	414
5,5	Turbia	377	323
6,0	Limpia	286	147
6,5	Limpia	264	147
7,0	Limpia	256	159
7,5	Turbia	419	213

#### 5.5 Influencia de la temperatura

Condiciones de reacción: [sulfato de alúmina] = 150 mg / l; Floccudex AS/10 = 5 mg/l, copolímero aniónico acrilamida-acrilato de peso molecular medio y carga aniónica media; volumen de reacción = 1 litro; decantación, 30 minutos; el pH regulado a 7; temperatura = 30°C

Los resultados se muestran en la Tabla N.º 8.

Se observa que el tratamiento es independiente de la temperatura.

### 6. PERFIL ANALÍTICO DE LA MUESTRA TRATADA

Las características químicas del efluente industrial tratado se indican en la Tabla N.º 9.

**Tabla N.º 8.** Resultados obtenidos en función de la temperatura

T (°C)	Volumen del material decantado (ml)	Volumen del material flotado (ml)	DQO fase libre (mg/l)	SST fase libre (mg/l)
2	---	110	194	36
25	---	115	175	32
30	---	110	175	24
40	---	110	191	23
50	---	115	150	20

Tabla N.º 9. Analisis de la muestra antes y despues del tratamiento

Parámetro	Unidades	Agua bruta	Agua tratada	Rendimiento
pH	Unid. pH	05-Oct	---	
DQO total	mg/l	1100	297	73%
DBO <sub>5</sub> total	mg/l	270	80	71%
SST	mg/l	500	50	90%
Aceites y grasas	mg/l	100	3	97%

## 7. CONCLUSIONES

Estos estudios han permitido el dimensionamiento de una planta de tratamiento físico-químico con separación de los contaminantes coagulados y floculados mediante flotación por aire disuelto, filtración de los lodos generados como flotado y pulido del agua clarificada por ósmosis inversa, para su posterior reutilización en una planta piloto construida y en operación.

La descripción de la instalación y los rendimientos industriales obtenidos serán objeto de una segunda parte de este estudio.

Este tipo de estudios sistemáticos permite la determinación de la receta de tratamiento a ejecutar en la planta industrial.

Por lo que respecta al tratamiento presentado:

- Los rendimientos obtenidos son de 70% en la disminución de DQO y DBOS.
- El rendimiento de remoción de tintes es de 90%.
- La reacción de coagulación-floculación muestra poca dependencia de la temperatura en el rango estudiado de 20 a 50°C, que cubre el intervalo en las descargas de planta.
- Las condiciones de reacción fijadas favorecen la flotación de sólidos frente a otros sistemas de separación sólido-líquido.

Se concluye que el tratamiento físico-químico de aguas residuales de industrias textiles es altamente eficaz usando una combinación de sal de aluminio como coagulante y un polímero aniónico de peso molecular medio y carga aniónica media (15 meq/gr.) como floculante.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Salas G., «Proceso de flotación por aire disuelto en el tratamiento de agua residual de bombeo en la industria de harina de pescado», *Rev. Pe. Quím. Ing Quím.* Vol. 6 N.º 1, pp. 60- 68 (2003).
- [2] APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 13<sup>th</sup> ed., American Public Health Association, New York.
- [3] Wastewater Engineering. Treatment., Disposal Reuse, *Metcalf & Eddy*, 3.<sup>a</sup> ed., McGraw-Hill, Inc., USA, pp. 474-578, 1991
- [4] Roques, H., Aurelle. Y. *Industrial Waste Water Treatment*. Eds. Kluwer, The Netherlands., pp. 155-174, 1991.
- [5] Hiemenz, P.C., *Principles of Colloid and surface Chemistry*, Ed. Marcel Dekker, New York, pp. 467-477, 1986.
- [6] Erik Jorgesen, S. *Industrial Waste Water Managent*, New York, 1999.