

# Remoción de color en aguas residuales del proceso de tinturado de una curtiembre mediante electrocoagulación

Removing color from a tannery dyeing process wastewater by electrocoagulation

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

RECIBIDO: MAYO 7; ACEPTADO: MAYO 31, 2012

Ana Lucía Orozco  
Sandra Patricia Castro  
sacastro@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali

## **Resumen**

Este estudio electroquímico muestra que es posible disminuir en un 98% la coloración de los residuos de tinturado de una curtiembre en menos de 10 minutos de reacción, si se electrogenera el floculante (electrocoagulación) en un sistema monopolar constituido por un cátodo de grafito y un ánodo de hierro, aluminio o cobre sometidos a una corriente constante. La respuesta en el tiempo del porcentaje de remoción de color se analizó por espectrofotometría (445 nm colorante tabaco y rojo; 575 nm para el colorante negro). El pH fue una variable que se optimizó durante la descontaminación electroquímica encontrándose que a valores mayores de pH 4.0 y menores de 7.0 el sistema electroquímico tiene un mejor desempeño. Estudios en función de la densidad de corriente, cantidad del electrolito soporte y la temperatura fueron también evaluadas; corrientes mayores e iguales a 0.214 A/cm<sup>2</sup>, temperatura ambiente y la no inserción de material electrolítico generan un mejor resultado costo-beneficio para la implementación del método electrocoagulativo.

## **Palabras Clave**

Electrocoagulación; descontaminación; aguas residuales; colorantes azo; curtiembres.

## **Abstract**

This electrochemical study points out the feasibility to decrease in a 98% the dyeing-process residues coloration from a tannery in less than a 10 minutes time reaction, when the flocculant is electrogenerated (electrocoagulation) in a monopolar system constituted by a graphite cathode and an iron, aluminum or copper anode subdued at constant current. The response in time of color-removal percentage was analyzed by spectrophotometry (445 nm red and brown dye; 575 nm for black dye). The pH was optimized during electrochemical decontamination finding that the electrochemical system has a better performance when values are higher than pH 4.0 and lower than 7.0. Studies of current density, amount of supporting electrolyte and temperature were also assessed; currents higher or equal to 0,214 mA/cm<sup>2</sup>, room temperature and no addition of supporting electrolyte, gave results in terms of cost-benefit for the implementation of the electrocoagulative method of analysis.

## **Keywords**

Electrocoagulation, decontamination; wastewater; azo dye; tannery

Se agradece a la Dirección General de Investigaciones de la Universidad Santiago de Cali por la financiación de este proyecto (N° 939077002) y al Dr. Jhon Hurtado por la revisión y correcciones.

## I. INTRODUCCIÓN

La intensificación de actividades industriales que ha tenido lugar desde la segunda mitad del siglo XIX hasta ahora, ha causado inevitablemente una severa contaminación ambiental con consecuencias dramáticas para la atmósfera, aguas, y suelos.

Las restricciones impuestas por nuevas legislaciones requieren iniciativas eficaces para la disminución de la contaminación no solamente en emisiones gaseosas y suelos, sino también la descontaminación adecuada de efluentes acuosos industriales.

La industria del curtido genera importantes beneficios para el país, tanto en el ámbito económico como en lo social, estando estrechamente ligada a los sectores productivos de la industria del calzado y marroquinería. Sin embargo, ha traído consigo serios problemas de contaminación ambiental debido a que esta actividad requiere utilizar sustancias altamente tóxicas que producen efluentes líquidos con pH bajos, altos contenidos de materia orgánica, altas concentraciones de material colorante, una alta concentración de sales, sulfuros, cromo, entre otros, los cuales requieren ser tratados antes de enviarlos como residuo a los ríos o caños (Munz, Gori, Cammilli, & Lubello, 2008).

Si bien es cierto que los colorantes de tipo azoicos son regularmente utilizados en el proceso de tinturado del cuero por la apariencia tipo metálico que imprimen al combinarse con el cromo y por la calidad en el matiz cubriente, no alterarse ante la luz o la humedad (Covington, 2006), también lo es que ellos son responsables de muchos efectos nocivos para el ambiente, la flora y la fauna acuática (Ohe, Watanabe, & Wakabayashi, 2004; Mathur, Bhatnagar, Nagar, & Bijarnia, 2005). Estos compuestos sintéticos disminuyen el oxígeno disuelto, generan eutricación y obstaculizan el paso de la luz que inhiben procesos fotosintéticos de plantas (Pearce, Lloyd, & Guthrie, 2003).

Este impacto se puede minimizar si se toman medidas para prevenir la contaminación y se aplican técnicas para reducir la carga contaminante de los desechos generados en el proceso de tinturado.

Algunos métodos implementados utilizan procedimientos biológicos (Senthilkumar, Surianarayanan, Sudharshan, & Susheela, 2008), coagulación química (Yilmaz, Boncukcuo, & Kocakerim, 2007), carbón activado (Ayoub, Hamzeh, & Semerjian, 2011),

ultrafiltración (Mendoza, Galiana, Lora, & Bes, 2010) y ozonólisis (Nakamura, Kobayashi, Daidai, & Kurosumi, 2008).

Los costos de estos tratamientos generalmente son altos, y cuando se utiliza la coagulación química se introduce cantidades extras de contaminantes de alta concentración.

La electrocoagulación como alternativa de descontaminación se basa en la aplicación de una corriente que involucra la generación *in situ* de coagulantes, iones metálicos en el ánodo e hidroxilos en el cátodo, que al unirse se desestabilizan formando un precipitado capaz de arrastrar por adsorción o precipitación los contaminantes en solución. Estudios de electrocoagulación para la remoción de  $\text{Cr}^{3+}$  (Golder, Samanta, & Ray, 2006), residuos de colorantes en los procesos de teñido (El-Ashtoukhy & Amin, 2010) y material inorgánico como nitratos y sulfitos entre otros (Benhadji, Ahmed, & Maachi, 2011) se encuentran en la literatura y muestran la necesidad de hacer pruebas preliminares para optimizar el proceso.

Siguiendo las directrices nacionales (Alzate & Tobón, 2004), algunas curtiembres colombianas vienen evaluando nuevos procesos para el tratamiento de sus aguas residuales. En esta comunicación, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para optimizar las condiciones de electrocoagulación que permitan disminuir la carga contaminante de tres colorantes (negro, rojo y tabaco) utilizados en el proceso de tinturado de una curtiembre ubicada en el departamento del Valle del Cauca.

## II. METODOLOGÍA

### A. Materiales, instrumentos y reactivos

La medida de la concentración de los colorantes se realizó espectrofotométricamente (Spectronic Genesys) a diferentes tiempos del proceso, utilizando celdas de plástico de 1 cm a las longitudes de onda máxima de absorción de los tres colorantes (445 nm para tabaco y rojo; 575 nm para el negro). Todos los reactivos fueron comprados a Merck y se trabajó con agua desionizada.

### B. Preparación de la muestra

La muestra fue suministrada por una curtiembre vallecaucana. La empresa no facilitó el nombre comercial de los colorantes utilizados, pero estableció que eran de procedencia azo. La muestra se tomó de los fulones (grandes recipientes cilíndricos, generalmente de madera

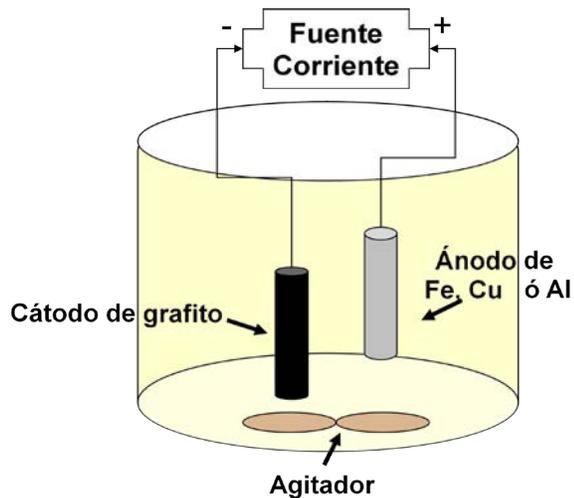
con movimientos rotatorios) utilizados para la fijación de color después del curtido. Se recolectó utilizando envases plásticos y se almacenó bajo refrigeración a 4°C. La muestra tomada de la curtiembre se filtró a través de un papel filtro de fibra de vidrio Whatman 934-AH bajo vacío. El líquido filtrado se sometió al proceso de electrocoagulación.

### C. Celda electroquímica

A la celda electroquímica monopolar (Figura 1), constituida por 250 mL de volumen, se le adaptó dos electrodos; un ánodo de hierro (29.0 cm<sup>2</sup>), cobre (28.1 cm<sup>2</sup>) o aluminio (54.9 cm<sup>2</sup>) y un cátodo de grafito (39.4 cm<sup>2</sup>), instalados con ayuda de un plato acrílico en la parte superior de la celda que permite 3 cm de separación entre ellos.

Los electrodos fueron conectados a una fuente de corriente variable (CEKIT K-0.53). La solución se sometió a agitación durante el proceso electroquímico, con la finalidad de homogenizar la muestra.

Figura 1. Montaje de la celda de electrocoagulación



### D. Optimización de variables

Se consideró la influencia del pH inicial de la muestra, para lo cual las aguas residuales se ajustaron a diferentes pH (entre 2,0 y 9,0) con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o NaOH; se adicionaron cantidades variables (0 a 2.0 g) de KCl a la celda electroquímica para incrementar la conductividad. Se probaron diferentes amperajes (0.020 a 0.500 mA/cm<sup>2</sup>) y temperaturas (15, 25 y 40 °C) con el fin de encontrar las condiciones óptimas del método electroquímico. Al final del experimento la solución tratada se centrifugó a 2000

rpm, durante quince minutos y finalmente se realizaron las lecturas espectrofotométricas.

## III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La muestra objeto de estudio con un pH de 4.4, corresponde a los residuos acuosos de la sección de tinturado en una curtiembre, constituida por una mezcla heterogénea de un líquido de color oscuro (depende del colorante aplicado) y material orgánico filtrable, compuesto por grasas y proteínas desnaturalizadas. Al aumentar o disminuir el pH de la muestra por métodos químicos (pH 2 a 9) no conlleva a la precipitación de los colorantes en la muestra, por lo cual la utilización de métodos de cambio de pH no son suficientes para reducir la intensidad de color en los residuos.

El proceso de electrocoagulación, independiente de las condiciones tratadas, genera un lodo de color similar al que portaba la muestra al inicio. El material particulado fue de fácil filtrabilidad. La reacción de oxidación que sufre el ánodo, que conllevan a la generación de los cationes Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>/ Fe<sup>3+</sup> o Cu<sup>2+</sup> produce corrosión en el electrodo.

Una vez se formaron los reactivos coagulantes se observó la desestabilización del contaminante coloidal, ya sea por la formación de complejos y/o por la adsorción superficial de complejos. El incremento del pH en la solución indica también un incremento de hidróxidos metálicos que facilitan la formación de flocúlos de mayor peso molecular.

La convección generada por el oxígeno producido como reacción secundaria en el ánodo y el hidrógeno generado debido a la reducción del agua en el cátodo, crea una suave combinación que ayuda a desestabilizar el coloide floculante formando partículas más grandes. La Tabla 1 muestra las reacciones que se presentan en la celda electrolítica (Mendoza et al, 2010; Golder et al, 2006)

El comportamiento general de los procesos de electrocoagulación de este trabajo se caracterizó por la producción de iones metálicos con posterior incremento de sólidos suspendidos por efecto de las reacciones de la electrocoagulación. Como consecuencia, los primeros cinco minutos del proceso generan un incremento de la absorbancia; a medida que transcurre el tiempo electrolítico los sólidos precipitaron y la absorbancia disminuyó y se estabilizó alrededor de los veinticinco minutos dependiendo de las condiciones iniciales de la muestra.

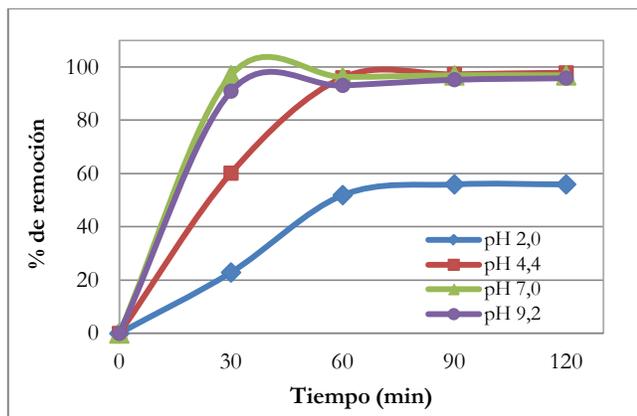
**Tabla 1 . Reacciones involucradas en los diferentes ánodos**

Electrodo	Reacciones
Aluminio	Ánodo: $Al_{(s)} \rightarrow Al^{+3}_{(ac)} + 3e^-$ $Al^{+3}_{(ac)} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3_{(s)} + 3H^+_{(ac)}$
	Cátodo: $3H_2O + 3e^- \rightarrow 3/2H_{2(g)} + 3(OH)^-_{(ac)}$
	Total: $Al_{(s)} + 6H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+_{(ac)} + 3(OH)^-_{(ac)} + 3/2H_{2(g)}$
<u>Mecanismo 1</u>	
Hierro	Ánodo: $4Fe_{(s)} \rightarrow 4Fe^{+2}_{(ac)} + 8e^-$ $4Fe^{+2}_{(ac)} + 10H_2O + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_3_{(s)} + H^+_{(ac)}$
	Cátodo: $8H^+_{(ac)} + 8e^- \rightarrow 4H_{2(g)}$
	Total: $4Fe + 10H_2O + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_3_{(s)} + 4H_{2(g)}$
<u>Mecanismo 2</u>	
Hierro	Ánodo: $Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{+2}_{(ac)} + 2e^-$ $Fe^{+2}_{(ac)} + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2_{(s)} + 2H^+_{(ac)}$
	Cátodo: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2(OH)^-_{(ac)}$
	Total: $Fe_{(s)} + 4H_2O \rightarrow Fe(OH)_2_{(s)} + H_{2(g)} + 2H^+_{(ac)} + 2(OH)^-_{(ac)}$
<u>Mecanismo 1</u>	
Cobre	Ánodo: $Cu_{(s)} \rightarrow Cu^+_{(ac)} + e^-$ $Cu^+_{(ac)} + H_2O \rightarrow Cu(OH)_{(s)} + H^+_{(ac)}$
	Cátodo: $H_2O + e^- \rightarrow 1/2H_{2(g)} + OH^-_{(ac)}$
	Total: $Cu_{(s)} + 2H_2O \rightarrow Cu(OH)_{(s)} + 1/2H_{2(g)} + OH^-_{(ac)} + H^+_{(ac)}$
<u>Mecanismo 2</u>	
Cobre	Ánodo: $2Cu_{(s)} \rightarrow 2Cu^+_{(ac)} + 2e^-$ $2Cu^+_{(ac)} + 3H_2O + 1/2O_{2(g)} \rightarrow 2Cu(OH)_2_{(s)} + 2H^+_{(ac)}$
	Cátodo: $2H^+_{(ac)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)}$
	Total: $2Cu_{(s)} + 3H_2O + 1/2O_{2(g)} \rightarrow 2Cu(OH)_2_{(s)} + H_{2(g)}$

*A. Efecto del pH*

El proceso de electrocoagulación se ve influenciado por el pH inicial. Los porcentajes de remoción para los residuos con el colorante negro, dependiente del pH inicial y del tiempo del proceso de electrocoagulación pueden observarse en la Figura 2; resultados análogos fueron obtenidos para los otros dos colorantes (tabaco y rojo).

**Figura 2. Efecto del pH en la remoción del color. (Colorante negro, Ánodo de aluminio, 25°C, 0.020 mA/cm2)**



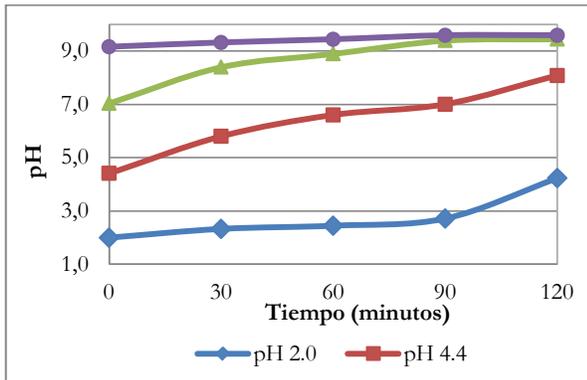
La mayor remoción del colorante se logra cuando la muestra presenta un pH inicial cercano a la neutralidad, (98% a 30 min), el valor de pH en donde la mayoría de los complejos de hierro, aluminio o cobre (coagulantes) se forman. Los complejos de Fe formados a este pH son  $Fe(OH)_2^{+}$  y  $Fe(OH)^{2+}$  y tienen una pronunciada tendencia a polimerizarse a un pH cercano a 7.0 generando  $Fe(H_2O)_6^{+3}$ ,  $Fe(H_2O)_5(OH)^{+2}$ ,  $Fe(H_2O)_5(OH)_2^{+1}$ ,  $Fe_2(H_2O)_8(OH)_2^{+4}$ ,  $Fe_2(H_2O)_6(OH)_4^{+2}$  especies que favorecen el proceso de floculación. Los complejos formados con Al son:  $Al(OH)_3(H_2O)_3_{(s)}$ ,  $Al(OH)^{+2}$ ,  $Al(OH)_2^{+}$ ,  $Al_2(OH)_2^{+4}$ ,  $Al(OH)_4^-$ ,  $Al_6(OH)_{15}^{+3}$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{+4}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{+4}$ ,  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{+7}$ ,  $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$  (Bayramoglu, Kobya\*, Taner, & Sozbir, 2004)

La cantidad y la variedad de productos de hidrólisis formados por la disolución anódica dependen significativamente del tiempo de electrólisis. Pero en el caso de las muestras con pH 2.0 y 4.4 alcanzan un punto máximo de eliminación después de los 30 minutos. A pH 9.2 también se logró un alto porcentaje de remoción (91%) en tiempos similares que a pH 7.0, pero requiere una adición de material basicificante que hace poco viable el

proceso en términos económicos.

El proceso de electrocoagulación reduce su eficiencia cuando se disminuye el pH de la muestra por debajo de 7.0. Esto puede deberse al incremento del tiempo para la generación de las especies coagulación.

**Figura 3. Evolución del pH en la electrocoagulación del colorante negro. (Ánodo de aluminio, 25°C, 0.020 mA/cm<sup>2</sup>)**



La evolución del pH en el medio de reacción (Figura 3) se incrementa a medida que avanza el tiempo, pero con tasas bajas, es decir, el proceso de electrocoagulación exhibe capacidad *bufferizante*, especialmente en medio alcalino. El incremento del pH con el tiempo se atribuye a la evolución de hidróxidos en el cátodo. Sin embargo, como la concentración del metal también se incrementa con el avance del proceso electrolytico, los complejos de metal polinucleares e hidróxidos metálicos formados comienzan a precipitar impidiendo con ello que el pH se eleve desproporcionadamente.

Los resultados anteriores indican que la electrocoagulación de los colorantes depende de la capacidad de adsorción sobre los productos hidrolizados o flocúlos. Dos mecanismos de interacción se proponen: precipitación y adsorción, la velocidad de estos depende del pH del medio y de los tipos de iones presentes, cada uno comienza a un pH diferente. La floculación en un rango de pH bajo se explica como las precipitaciones, mientras que en un rango de pH mayor a 6,5 como adsorción (Mollah et al, 2004)

**Tabla 2. Posibles mecanismos de interacción de los colorantes**

**Precipitación:**

Colorante + M monomérico → (Colorante-monomérico M)<sub>(s)</sub> pH: 4-5

Colorante + M polimérico → (Colorante-polimérico M)<sub>(s)</sub> pH: 5-6

**Adsorción:**

Colorante + M(OH)<sub>n(s)</sub> → Flóculos pH > 6.5

(Colorante polimérico M)<sub>(s)</sub> + M(OH)<sub>n(s)</sub> → Flóculos pH > 6.5

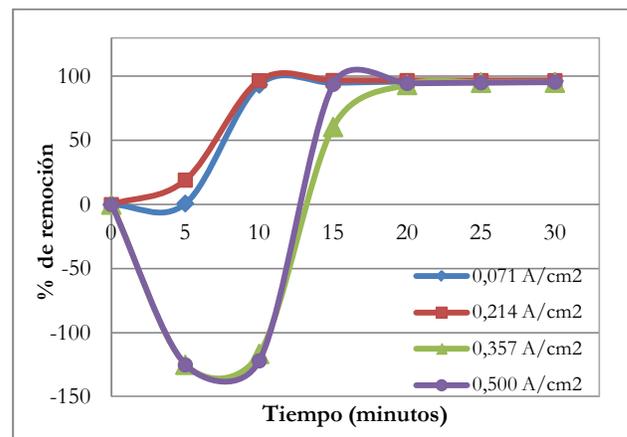
M: Metal utilizado

**B. Efecto de la densidad de corriente**

La tasa de eliminación del colorante depende fundamentalmente de la densidad de corriente; valores altos generan altas cantidad de iones (Fe<sup>+2</sup>, Fe<sup>+3</sup>, Al<sup>+3</sup>, Cu<sup>+1</sup>, Cu<sup>+2</sup>), que reaccionan con las moléculas del colorante mejorando la eficiencia de eliminación. Sin embargo, es aconsejable limitar la densidad de corriente, a fin de evitar un exceso de oxígeno, impidiendo de esta manera otros efectos adversos, como la generación de turbidez debido a la presencia exagerada de espuma.

Los resultados representados en la Figura 4 muestran que un aumento de la densidad de corriente obtiene mejores resultados, pero después de cierto valor (0,214 mA/cm<sup>2</sup>) prima la formación de burbujas en el medio y la generación de iones metálicos (M<sup>+n</sup>) que aumenta la absorbancia, aspecto que hace que la turbidez de la muestra se incremente (véase valores negativos del porcentaje de remoción) y que al final no son criterio para establecer la verdadera remoción del colorante; después de que las burbujas producidas por la generación de hidrógeno y oxígeno gaseoso se estabilizan con el tiempo, se alcanza el valor máximo de la remoción (cercano a 98%).

**Figura 4. Efecto de la densidad de corriente en la tasa de remoción (Colorante negro, ánodo de hierro, 25°C, 2,0 g KCl, pH de 7.0)**



Dado que el aumento de la corriente incrementa la tasa de dosis del coagulante y que resulta una mayor cantidad de precipitado en la fase estable (Holt, Barton, Wark, & Mitchell, 2002), se tiene que para el colorante negro, a pH inicial de 7.0 y temperatura de 25°C, presenta una fase estable posterior de 15 minutos; a tiempos menores, el incremento de la corriente conlleva a la formación de burbujas, impulsando más rápido el flujo hacia arriba, y por lo tanto haciendo más rápida la remoción del

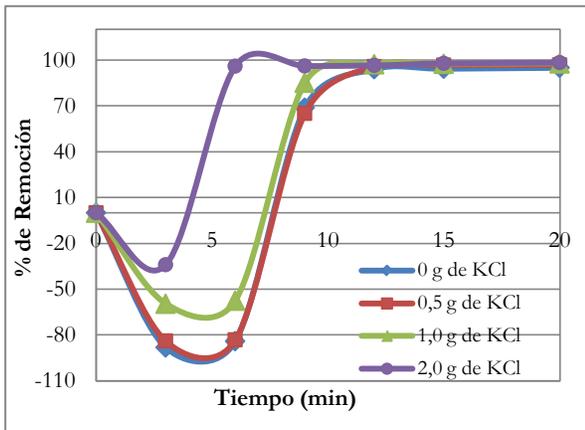
contaminante y coagulante por flotación. Lo anterior se puede explicar dado que a mayor corriente más coagulante es desarrollado por unidad de tiempo, pero decrece su tiempo de residencia en el reactor, por lo tanto hay una reducción en la probabilidad de colisión y adherencia entre el contaminante y coagulante generando una competencia entre el proceso de flotación y el de sedimentación. Es decir, en las condiciones de la celda utilizada a valores menores de 0.214 mA/cm<sup>2</sup> el proceso que se favorece es el de sedimentación y a valores mayores el proceso que se favorece es el de flotación.

*C. Efecto del electrolito soporte*

La eliminación del color aumentó cuando se acrecentó la concentración del electrolito (KCl) en la solución sometida a electrocoagulación (Figura 5) lo cual puede deberse a una disminución de la resistividad y por ende se aumenta la densidad de corriente experimentada por los electrodos, dado que hay una mayor movilidad de los iones en la solución hacia los electrodos que conllevan a una mayor eficiencia en la remoción. Aumentar el KCl en la solución disminuye la formación de burbujas y la efectividad de formación de los polímeros hidroximetálicos es mayor, por ende se favorece la fase de sedimentación a menor tiempo (Mollah & et al., 2004).

Aunque el incremento de los electrolitos mejora la eficiencia de la remoción, disminuyendo en el tiempo casi en un 25% para una remoción igual al 98%, se optó por realizar los experimentos posteriores adicionado una menor cantidad de electrolito para reducir al mínimo la adición de químicos al medio, que incrementan el costo de la técnica y que pueden generar relaciones colaterales indeseadas.

**Figura 5. Efecto del electrolito en el porcentaje de remoción.** (Colorante negro, ánodo de hierro, 25°C, pH 7.0; 0.091 mA/cm<sup>2</sup>)

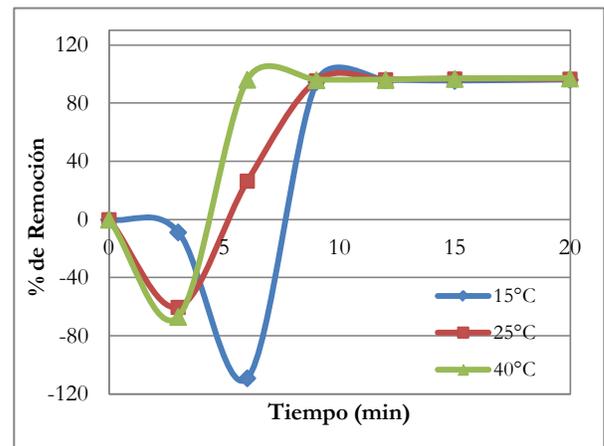


*D. Efecto de la temperatura*

La disminución de la temperatura retrasa el proceso de formación de iones metálicos (M<sup>n+</sup>), dado que a 2,5 minutos (Figura 6) no hay cambio de la respuesta de absorbancia del colorante, en contraposición en los experimentos donde se incrementó la temperatura (25 a 40°C), el incremento de los iones metálicos genera un incremento en la absorbancia. A 40°C se mejora la fase de sedimentación, dado que la muestra en 6 minutos de reacción, ha disminuido un 96% del color comparado con el 27% cuando se realiza a temperatura ambiente. La razón por la cual incrementa la eficacia de eliminación, podría ser un aumento de la movilidad y la colisión de iones de polímeros metalhidroxilo.

No se realizaron estudios a temperaturas mayores a 40°C debido que a valores muy altos se altera la atracción electrostática, desmejorando con ello la coagulación (Mollah et al, 2004). Teniendo en cuenta que a nueve minutos todos los sistemas trabajados presentaron igual remoción, se concluye que a nivel de costos y eficiencia, la temperatura no influye significativamente en la reacción y se decide continuar los experimentos a temperatura ambiente.

**Figura 6. Efecto de la temperatura en el porcentaje de remoción.** (pH de 7.0, 2,0 g de KCl, 0.214 mA/cm<sup>2</sup>)



*E. Material de los ánodos*

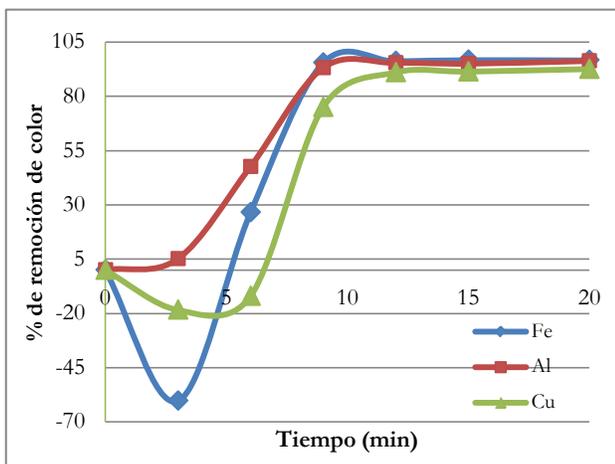
Los procesos de electrocoagulación son dependientes del tipo de ánodo utilizado, debido a que la interacción del ion metálico generado en él con los iones hidroxilo cambian, y por ende pueden modificar las formas poliméricas metalhidroxilo que son las responsables de la coagulación. La Figura 7 muestra los porcentajes de remoción del contaminante negro al variar el material de los electrodos, manteniendo constante las condiciones de

pH, densidad de corriente, electrolito soporte y temperatura.

Los electrodos de hierro y cobre evidencian una disminución del porcentaje de remoción en los primeros seis minutos de reacción, debido a la formación de turbidez y al incremento de la absorbancia por la formación de los iones metálicos.

Por otro lado, el electrodo de aluminio solo exhibe aumento del porcentaje de remoción dado que el ion  $Al^{3+}$  es transparente para la longitud de onda donde se efectuaron las medidas.

Figura 7. Respuesta del porcentaje de remoción por efecto del tipo de ánodo. (25°C, pH 7.0, 0.214 mA/cm<sup>2</sup>)



Un valor agregado que tuvo el electrodo de aluminio es su bajo desgaste (3%) frente a los otros electrodos (Fe: 6%; Cu: 12%). En condiciones óptimas el electrodo de hierro, requiere nueve minutos para obtener la misma remoción de color que el aluminio, convirtiéndose en una gran alternativa en esta aplicación por ser más económico. El electrodo de cobre, por el contrario, aunque disminuye la absorbancia, no logra tan buenos resultados como los otros dos materiales.

#### F. Otros colorantes azo

El comportamiento de remoción del color por medio de la electrocoagulación depende del tipo de colorante que constituye el residuo acuoso (Figura 8), el colorante rojo presenta una mejor desestabilización dado que la remoción se hace más rápida, seguida por el color tabaco; estos dos colorantes no experimentan porcentajes de remoción negativos, lo cual está acorde con la longitud de onda en la cual se efectuaron las medidas (445 nm) donde los iones  $Cu^{2+}$  y  $Fe^{3+}$  no absorben.

Figura 8. Porcentaje de remoción de aguas residuales con diferentes colorantes aplicando el método electrocoagulativo. (Ánodo de hierro, 25°C, pH 7.0, 0.214 mA/cm<sup>2</sup>)

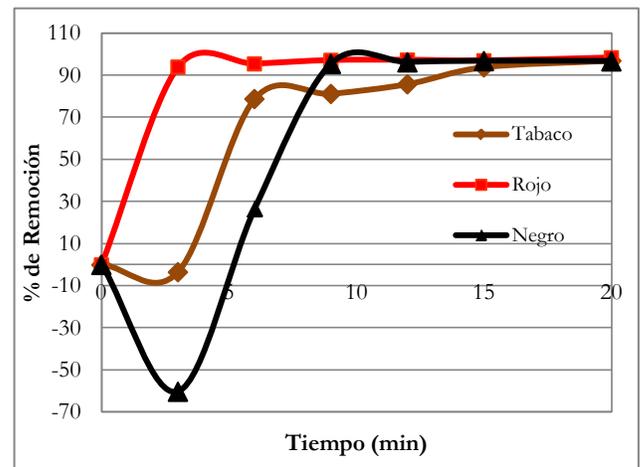


Tabla 3. Resumen de la optimización de variables para los residuos de los tres colorantes

Condiciones optimizadas	Rojo	Tabaco	Negro
Ánodo	Hierro	Hierro	Aluminio
Densidad corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	0,071	0,071	0.214
pH	6.5	6.0	7.0
Temperatura (°C)	25	25	40
Cantidad Electrolito (g/250 mL)	0,5	1,5	2,0
Tempo (Min)	3	5	9
Máxima remoción (%)	97	98	98

La Tabla 3 resume los alcances logrados en los residuos con los tres colorantes. En general, los electrodos de aluminio y de hierro son los que presentan mejor desempeño, bajas densidades de corriente y temperatura ambiente son los que generan remociones mayores al 96% a tiempos inferiores de 10 minutos. Dado que la empresa no suministró los nombres de los colorantes y por ende no se tiene la estructura de ellos, es imposible explicar cuáles son las razones para que los colorantes rojo y tabaco sean más fáciles de electrocoagular. Pero, acorde con que los porcentajes de remoción de color están por encima del 96% para los tres tipos de colorantes, se extrapola que esta metodología es aplicable para el tratamiento de los colorantes en aguas residuales del proceso de tinturado de la curtiembre.

## IV. CONCLUSIONES

La electrocoagulación fue una técnica versátil, económica y sencilla para la remoción de color en desechos producidos durante el tinturado del cuero. Las muestras no requieren tratamientos rigurosos antes del

procedimiento electroquímico. Dependiendo del tipo de colorante que constituyen las aguas residuales, las variables que influyen la electrocoagulación como pH, temperatura, corriente, pueden cambiar. Los colorantes rojo y tabaco requieren menor densidad de corriente y menor pH que el colorante negro. En general los colorantes se pueden trabajar a temperatura ambiente (25 °C), un pH cercano a la neutralidad y una densidad de corriente inferior a 0.214mA/cm<sup>2</sup> para tener porcentajes de remoción cercanos al 98% en menos de 10 minutos.

## V. REFERENCIAS

- Alzate, M., & Tobón, O. (2004). *Manual Ambiental sectorial: Proyecto gestión ambiental en el sector curtientes*. Bogotá, Colombia: Centro Nacional de Producción mas Limpia y Tecnologías Ambientales
- Ayoub, G., Hamzeh, A., & Semerjian, L. (2011). Post treatment of tannery wastewater using lime/bittern coagulation and activated carbon adsorption. *Desalination*, 273, 2-3, 359-365
- Bayramoglu, M., Koby, M., Taner, O., & Sozbir, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, 37, 117-125
- Benhadji, A., Ahmed, M., & Maachi, R. (2011). Electrocoagulation and effect of cathode materials on the removal of pollutants from tannery wastewater of Rouïba. *Desalination*, 277, 1-3, 128-134
- Covington, A. D. (2006). The chemistry of tanning materials. En: Kite, M. & Thomson, R. *Conservation of leather and related materials*, Italy: Elsevier. pp 22-35
- El-Ashtouky, E., & Amin, N. (2010). Removal of acid green dye 50 from wastewater by anodic oxidation and electrocoagulation-A comparative study. *Journal of Hazardous Materials*, 179, 1-3, 113-119
- Golder, A., Samanta, A., & Ray, S. (2006). Removal of Cr<sup>3+</sup> by electrocoagulation with multiple electrodes: Bipolar and monopolar configurations. *Journal of Hazardous Materials*, 141, 653-661
- Holt, P. K., Barton, G. W., Wark, M., & Mitchell, C. A. (2002). A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211, 2-3, 233-248
- Mathur, N., Bhatnagar, P., Nagar, P., & Bijarnia, M. (2005). Mutagenicity assessment of effluents from textile/dye industries of Sangner, Jaipur (India): a case study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 61, 1, 105-113
- Mendoza, J., Galiana, M., Lora, J., & Bes, A. (2010). Purification of tannery effluents by ultrafiltration in view of permeate reuse. *Separation and Purification Technology*, 70, 3, 296-301
- Mollah, M., et al. (2004). Treatment of orange II Azo dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 109, 1-3, 165-171
- Munz, G., Gori, R., Cammilli, L., & Lubello, C. (2008). Characterization of tannery wastewater and biomass in a membrane bioreactor using respirometric analysis. *Bioresource Technology*, 99, 18, 8612-8618
- Nakamura, F., Kobayashi, F., Daidai, M., & Kurosumi, A. (2008). Purification of seawater contaminated with undegradable aromatic ring compounds using ozonolysis followed by titanium dioxide treatment. *Marine Pollution Bulletin*, 57, 1-5, 53-58
- Ohe, T., Watanabe, T., & Wakabayashi, K. (2004). Mutagens in surface waters: a review. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 567, 2-3, 109-149
- Pearce, C., Lloyd, J., & Guthrie, J. (2003). The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells: a review. *Dyes and Pigments*, 53, 3, 179-196
- Senthilkumar, S., Surianarayanan, M., Sudharshan, S., & Susheela, R. (2008). Biological treatment of tannery wastewater by using salt-tolerant bacterial strains. *Microbial Cell Factories*, 7-15

- Yilmaz, A., Boncukcuo, R., & Kocakerim, M. (2007). A quantitative comparison between electrocoagulation and chemical coagulation for boron removal from boron-containing solution. *Journal of Hazardous Materials*, 149(2):475-81.

## VI. CURRÍCULO

*Sandra Patricia Castro Narváez*: Química (1999) y Magister en Ciencias: Química de la Universidad del Valle (2004). Docente de Tiempo Completo de la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad Santiago de Cali (2005) y miembro del Centro de Investigación en Ciencias Básicas, Ambientales y Desarrollo Tecnológico (CICBA) y del Grupo de Investigación en Aseguramiento de la Calidad (GIASCA). Su especialidad es el electroanálisis de moléculas con interés tecnológico, biológico y medio ambiental. Adelanta estudios de Doctorado en Láseres y Espectroscopia avanzada en Química de la Universidad Pablo de Olavide (Sevilla, España).