

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

REMOCIÓN DEL COLORANTE IRIS NEGRO N° 24 POR ELECTROCOAGULACIÓN

*Sandra Correa¹
Juan P. Penagos¹
Juan S. Londoño¹
Gonzalo Taborda¹

REMOVAL OF DYE BLACK IRIS NO. 24
BY ELECTROCOAGULATION

Recibido el 11 de septiembre de 2014; Aceptado el 19 de junio de 2015

Abstract

Iris removal of black dye in water, electrocoagulation (EC) was performed in batch mode, using a glass container for up to five liters with 4 electrodes Aluminum (Al) used as anode electrodes and 4 Iron (Fe) used as cathodes in various tests with currents of 2, 6, 10 A, for 24 minutes, sampled every 3 min for 8 data representative of the process and change variables during electrolysis as response variables were studied pH, temperature, conductivity, turbidity, energy consumption, potential, total dissolved solids (TDS), and removal of color, in order to find the best settings removing the dye, both in terms of time and current as the type electrode used as anode; the best color removal was obtained at a current of 2 A, to a time of 24 minutes with anode being 98.1% Fe fading, however at 6 min a percentage of 88.65% is obtained making the difference between these figures is not statistically significant but in terms of time whether it would be useful to reduce the cost of treatment, using the anode Al one color removal of 97.68% was obtained at a time of 9 min with a current of 2 A, suggesting that although Fe as greater removal is achieved anode this would involve increased time and production EC waters with iron residues resulting from wear sacrificial electrode, decreasing in turbidity it is achieved by 64.1% of Fe with the anode Al treatment 15 min while anode is Al achieves a 70.45% removal also at 6 A treatment 12 min.

Key Words: Conductivity, Dyes, Electrocoagulation, Electrolysis, Turbidity.

¹ Universidad de Caldas, Colombia.

*Autor correspondiente: Universidad de Caldas, Sede Principal, Calle 65 N° 26-10 A.A. 275, Colombia.

Email: sandracorrea1031@hotmail.com

Resumen

La remoción del tinte Iris negro en agua, por electrocoagulación (EC) se realizó en modo Batch, utilizando un recipiente de vidrio con capacidad para 5 litros con 4 electrodos de Aluminio (Al) utilizados como ánodos y 4 electrodos de Hierro (Fe) utilizados como cátodos en diferentes ensayos con intensidades de corriente de 2, 6, 10 A, durante 24 minutos, tomando muestras cada 3 min para obtener 8 datos representativos del proceso y cambio de las variables durante la electrólisis, como variables de respuesta se estudiaron el pH, temperatura, conductividad, turbidez, consumo energético, potencial, sólidos disueltos totales (SDT), y remoción de color, con el fin de hallar los mejores parámetros de remoción del colorante, tanto en condiciones de tiempo e intensidad de corriente como en el tipo de electrodo utilizado como ánodo; la mejor remoción de color se obtuvo con una intensidad de corriente de 2 A, a un tiempo de 24 minutos con ánodo de Fe siendo del 98,1% de decoloración, sin embargo a los 6 min se obtiene un porcentaje de 88,65% haciendo que la diferencia entre estos datos no sea muy significativa estadísticamente pero en términos de tiempo si sería muy útil para disminuir el costo del tratamiento, utilizando el ánodo de Al se obtuvo una remoción de color del 97.68% a un tiempo de 9 min con una intensidad de corriente de 2 A, lo que sugiere que aunque con Fe como ánodo se logra mayor remoción esto implicaría el aumento del tiempo de EC y la producción de aguas con residuos de hierro que resultan del desgaste del electrodo de sacrificio, la disminución en la turbidez se logra en un 64.1% con ánodo de Fe a los 6 A con 15 min de tratamiento, mientras que con ánodo de Al se logra un 70.45% de remoción también a los 6 A con 12 min de tratamiento.

Palabras clave: Conductividad, Colorantes, Electrocoagulación, Electrólisis, Turbidez.

Introducción

Para el tratamiento de aguas residuales a través del tiempo se han llevado a cabo métodos de tipo biológicos, y físico-químicos, cada uno de ellos tiene una eficiencia que pueden brindar a las poblaciones una calidad en la eliminación de algunos contaminantes, sin embargo existen otros contaminantes que no son eliminados con la misma eficiencia y que podrían causar mucho daño a la población humana y animal, tales como colorantes provenientes de industrias textiles, los cuales tienen un gran impacto medioambiental y toxicológico debido a los diferentes procesos de su producción y utilización de gran cantidad de productos químicos en prácticas como teñido, acabados, estampados y tintura. (Walters, 2005) por tal motivo y como alternativa de descontaminación de aguas han surgido algunos procesos llamados procesos avanzados de oxidación (PAOs), entre ellos están las técnicas electroquímicas como la electrocoagulación (EC) que ha sido utilizada desde el siglo XX en determinados casos para la eliminación de algunos contaminantes orgánicos en diversas aguas residuales (Restrepo *et al.*, 2006).

Como consecuencia del proceso de teñido es la gran cantidad de agua que se genera como residual, alrededor de 21 a 45 Litros por kg de tela seca para cada teñido (Contreras, 2006). La electrocoagulación es una técnica electroquímica que ha sido utilizada desde el siglo XX, fue patentada en Estados Unidos en el año 1909, (Chen, 2004) su principio es la remoción de sustancias contaminantes por medio de la generación de especies desestabilizantes de partículas

que se encuentran suspendidas, por medio de la inducción de corriente eléctrica para disolver o degradar un electrodo de sacrificio en el agua a través de placas metálicas de diversos materiales, siendo los más utilizados el aluminio y el hierro formando así especies con el ion hidróxido (OH^-) producto de la reacción de electrolisis del agua que tiene lugar en el cátodo, con Al (III), Fe(II) y Fe (III) dependiendo del pH, (Brillas, 2009), de esta forma se puede lograr la separación o remoción de los tintes en las aguas residuales, se ha mostrado que la EC tiene buenos rendimientos en remoción de color, turbidez y materia orgánica en efluentes en las industrias textiles, tintorerías, colorantes, y lavanderías.

Es por esto que en esta investigación se busca a través de la técnica de Electrocoagulación (EC) obtener un alto porcentaje de remoción de color IRIS negro, contenido en agua, estudiando diferentes variables como la intensidad de corriente, el tiempo de tratamiento y el tipo de ánodo.

Métodos

Montaje de electrocoagulación (EC)

Para llevar a cabo la electrocoagulación se utilizó un reactor de vidrio tipo Batch con capacidad para 5 litros, la concentración utilizada fue de 220 mg/L (cantidad necesaria para obtener agua dopada y fuertemente colorida) resultantes de la disolución de 1 g de tinte iris disueltos en 4.5 litros de agua de la llave, teniendo en cuenta que la concentración que llega a los cuerpos de agua incluso pueden ser menor porque se encuentra más diluida se tomó esta cantidad de referencia que tornara el agua potable de la llave en un agua turbia, y de un color poco estético, se utilizaron 4 electrodos de Al y 4 de Fe utilizados como ánodos y cátodos en diferentes ensayos, se les realizó un proceso de limpieza con una lija n° 400 con el fin de generar una superficie activa para el proceso de electrolisis, su área de superficie de 604.9 cm^2 para los dos tipos de ánodos, dispuestos de forma alterna entre ellos a una distancia interelectrodica de 1 cm, se utilizaron diferentes intensidades de corriente de 2A, 6A y 10A, con el objetivo de controlar la velocidad de la reacción y el proceso cinético; se registró el tiempo hasta 24 min, se tomaron muestras cada 3 min. Los ensayos se realizaron por duplicado a las mismas condiciones.

pH

El comportamiento observado del pH es de aumento hasta un punto máximo y después decae, cerca de este punto por debajo es donde se encuentra la mayor remoción de color, el pH fue medido con un potenciómetro Accumet AB 15/15. El aumento en el pH describe la formación de especies hidroxilo (OH^-), las cuales posteriormente formaran especies desestabilizantes que pueden adsorber químicamente los contaminantes (Chen, 2004) y finalmente llevan a la remoción del color formando sedimentaciones o formando flóculos de mayor tamaño que se alejan en la superficie. Las ecuaciones que se llevan a cabo en el proceso de EC son:

Para el ánodo de Aluminio



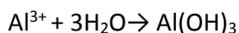
Ecuación (1)

Para el ánodo de Hierro

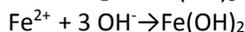


Ecuación (2)

En condiciones alcalinas

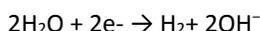


Ecuación (3)



Ecuación (4)

La reacción en el cátodo es:

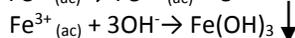


Ecuación (5)

El incremento del pH y la formación de O_2 , llevan en el proceso de EC a las siguientes reacciones (Linares H. I., 2011):



Ecuación (6)



Ecuación (7)

El hidróxido de hierro es insoluble en sistemas acuosos lo que genera la formación de coloides desestabilizantes de color amarillo, lo cual no pasa con el ánodo de Aluminio lográndose una mayor clarificación del agua a descontaminar.

Temperatura

La temperatura en el proceso de electrocoagulación se ve afectada con el voltaje y la intensidad de corriente, a medida que aumenta la corriente aumenta la temperatura, Aunque el cambio que registro fue muy poco, esto demuestra que a medida que aumenta la temperatura, también se aumenta la remoción del colorante, haciendo que los flóculos sean más grandes a mayor intensidad de corriente de 10A.

Conductividad

La conductividad en una solución muestra la facilidad con que el sistema hace un transporte de los iones disueltos, el comportamiento observado fue relativamente constante con algunas variaciones de ± 0.1 mS/cm durante los 24 minutos de la EC, indiscriminadamente en todas las intensidades de corriente como en el tipo de ánodo de Al o Fe, para su medición fue empleado un Conductivímetro Hanna EC 214 a la temperatura indicada por cada muestra a lo largo del proceso.

Turbidez

Para su medición se utilizó un turbidímetro Turb® 550, La turbidez del agua se ve afectada con la cantidad de color, ya que este le resta capacidad para transmitir la luz debido al material en suspensión, a lo largo de los ensayos se da un cambio importante en la turbidez, siendo en los

primeros tiempos de casi el doble y finalmente presenta una disminución cerca del punto donde hay la mayor remoción de color, posteriormente este parámetro vuelve a cambiar aumentando la turbidez del agua tratada, este comportamiento se evidencia tanto para el ánodo de Al como en el ánodo de Fe y en las diferentes intensidades de corriente utilizadas.

Consumo Energético

El consumo energético se calculó para cada tipo de ánodo y durante los 24 minutos de la EC con base en la siguiente ecuación mostrando magnitudes de Kwh/L:

$$CE = \frac{E * I * T}{V}$$

Ecuación (8)

Dónde:

E(v): Potencial en voltios

I(A): Intensidad de corriente en Amperios

T(h): Tiempo en horas

V(l): Volumen en litros

Solidos Disueltos Totales (SDT)

Para su medición se utilizó un dispositivo digital (TDS-4 Pocket-Size TDS Meter), el cual nos da la cantidad de solidos disueltos en ppm.

Remoción de color

Para la medida de la remoción de color se utilizó el método espectrofotométrico (Xiaoninget *al.*, 2010), se utilizó un espectrofotómetro UV/Vis Mecasys, Optizen Pop Bio. Cada medición se realizó por triplicado. La ecuación utilizada fue:

$$\%n = \frac{ABS_i - ABS_f}{ABS_i} * 100$$

Ecuación (9)

En donde:

n: Remoción de color

ABS_i: Absorbancia máxima inicial de la muestra sin tratamiento

ABS_f: Absorbancia máxima al final de cada tiempo de tratamiento

Se midió tanto el color aparente como el color real, el color real se obtuvo de las muestras obtenidas a cada tiempo de electrolisis y se filtró Utilizando un papel filtro de 90 mm, 300209, posteriormente se midió su absorbancia a la máxima longitud de onda registrada después de cada tiempo de tratamiento.

Resultados y discusión

Análisis de pH

En la figura 1, se muestra el comportamiento del pH, con el aumento del tiempo en cada una de las intensidades de corriente aplicada utilizando ánodo de Hierro. En la figura 2, se muestra el comportamiento del pH, con el aumento del tiempo en cada una de las intensidades de corriente aplicada utilizando ánodo de Aluminio.

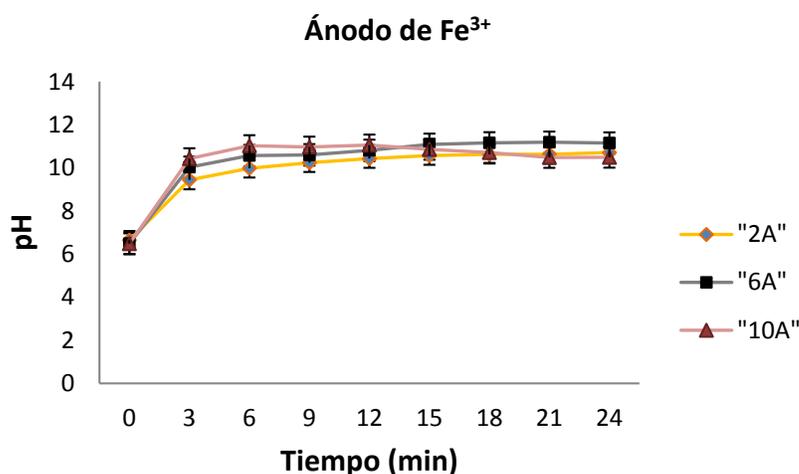


Fig. 1. pH vs tiempo con Ánodo de Hierro

En las fig. 1y 2 se muestra como el pH aumenta a medida que aumenta el tiempo pero solo hasta un punto máximo con las intensidades de corriente de 6 A, siendo este aumento mayor en los primeros 6 min de EC, y después permanece casi constante lo que indica que las especies que se forman como hidróxidos algunas son precipitadas, mientras que otras pueden quedarse en medio de los electrodos haciendo que se aglutinen y ya no se produzcan más, se puede inferir también que independientemente del tipo de ánodo utilizado se están formando las especies de hidróxidos del metal más estables ya que como se muestra el pH es casi constante a partir del minuto 6, es decir $\text{Al}(\text{OH})_3$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Con la disminución del pH se puede evidenciar la presencia de color que puede ser de tipo color aparente aportado por los electrodos, es por esto importante tener un tiempo determinado para el proceso de EC, debido a que a mayor tiempo se puede estar generando una mayor contaminación del agua (Sepúlveda *et al.*, 2007). En síntesis el aumento del pH genera una disminución de la cantidad de color en el agua. Se sabe que el pH está directamente relacionado con la velocidad de reacción, haciendo que a medida que aumente o disminuya sea el proceso de electrolisis más largo o más corto (Linares *et al.*, 2011), en los tiempos de 18 min hasta 24 min se observa como el pH tiene un descenso lo que explica por qué se da un

mayor aumento del color en dichos tiempos. El análisis de varianza mostro que existe una relación estadísticamente significativa entre el pH y la intensidad de corriente con una confianza del 95% utilizando ánodo de Aluminio.

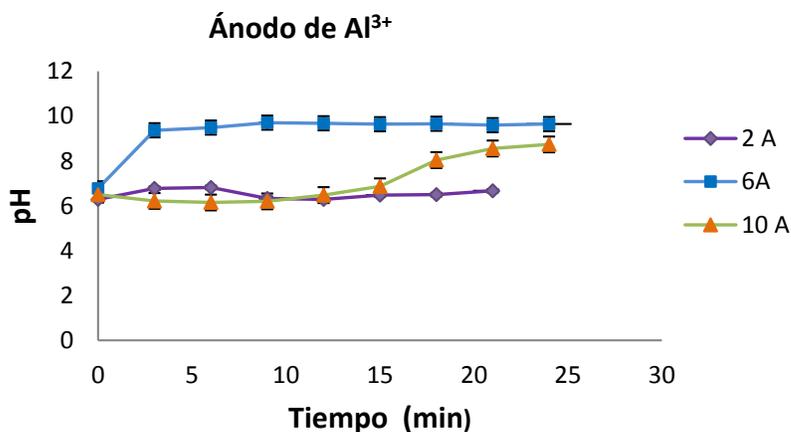


Fig. 2. pH vs tiempo con Ánodo de Aluminio

Análisis de la Turbidez

En la figura 3 se muestra el comportamiento de la turbidez desde el tiempo cero, sin ningún tratamiento y durante los 24 minutos de EC, con cada una de las intensidades de corriente y utilizando ánodo de Hierro.

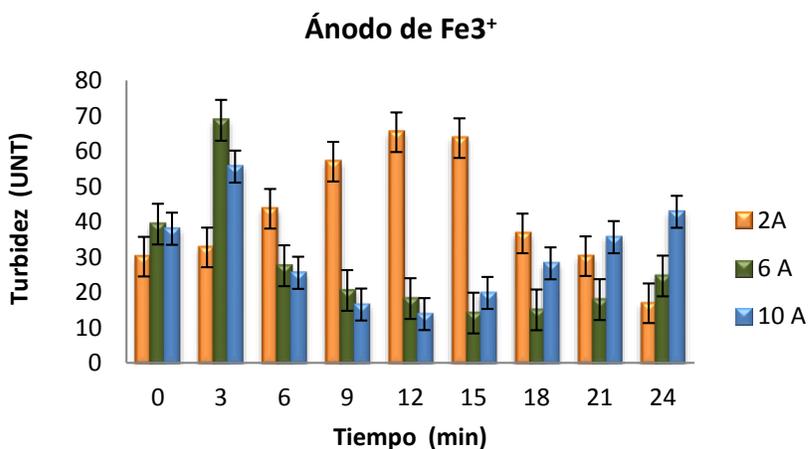


Fig. 3. Turbidez vs Tiempo con ánodo de Hierro.

En la figura 4, se muestra el comportamiento de la turbidez desde el tiempo cero, sin ningún tratamiento y durante los 24 minutos de EC, con cada una de las intensidades de corriente y utilizando ánodo de Aluminio.

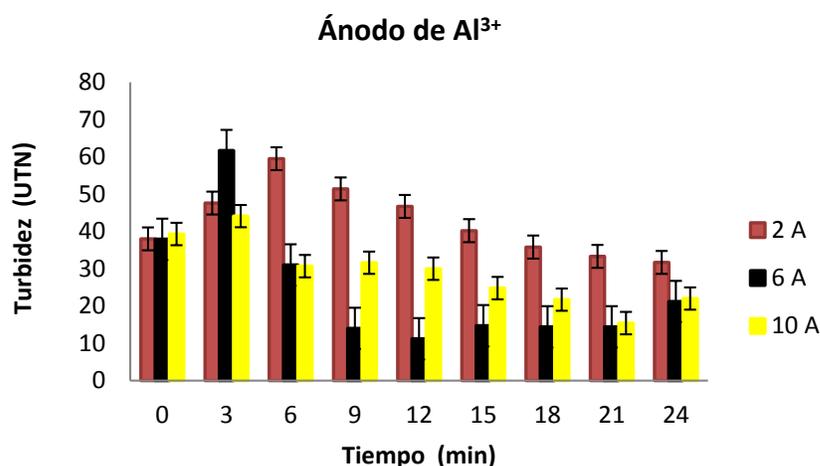


Fig. 4. Turbidez vs Tiempo con ánodo de Aluminio.

En las figuras 3 y 4, se muestra el comportamiento de la turbidez a medida que avanza el proceso de EC, con el aumento en la intensidad de corriente aumenta la turbidez hasta los 3 min y en el caso del ánodo de Fe en la fig. 3 el mayor aumento se registra a los 12 min, este comportamiento con los dos tipos de ánodos posiblemente se da debido a que el sistema empieza a formar iones Al^{3+} , Fe^{3+} , OH^- , que desestabilizan en forma de hidróxidos el material suspendido haciendo que se genere dicho aumento en las partículas dispersas de mayor tamaño, después de los primeros 3 min para las intensidades 6A y 10A la turbidez empieza a bajar lo que indica una disminución en la cantidad de color, la menor turbidez se logra a 6A en un tiempo de 12 min con una disminución de turbidez del 70.45 %, el aumento de la turbidez que se presenta entre los tiempos 12 y 18 muy posiblemente se da por la generación de iones aportados por los electrodos haciendo que nuevamente se dé un aumento en la cantidad de color del agua y por ende una mayor turbidez, lo anterior indica, que el tiempo de EC, tiene un efecto importante en la turbidez haciendo que a medida que éste aumente se generen nuevas partículas o iones que están suministrando al agua material en suspensión y otros posibles colores debido a iones aportados por los electrodos que aumentan el color real. Por lo cual el tiempo óptimo para el proceso de EC a una intensidad de corriente de 6A es 12 min con los dos tipos de ánodos ya que con el ánodo de Al también se registró la menor turbidez a este tiempo con esta intensidad de corriente y el comportamiento durante el tiempo de electrolisis fue semejante.

Análisis de la Conductividad

En la figura 5 se muestra el comportamiento de la conductividad a través del tiempo de EC, utilizando ánodo de Hierro y con cada una de las intensidades de corriente utilizadas.

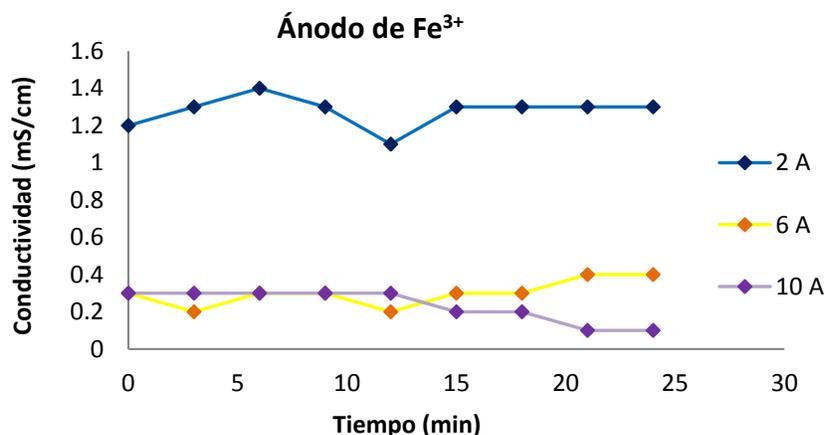


Fig. 5. Comportamiento de la Conductividad vs tiempo con ánodo de Hierro.

En la figura 6 se muestra el comportamiento de la conductividad a través del tiempo de EC, utilizando ánodo de Aluminio y con cada una de las intensidades de corriente utilizadas.

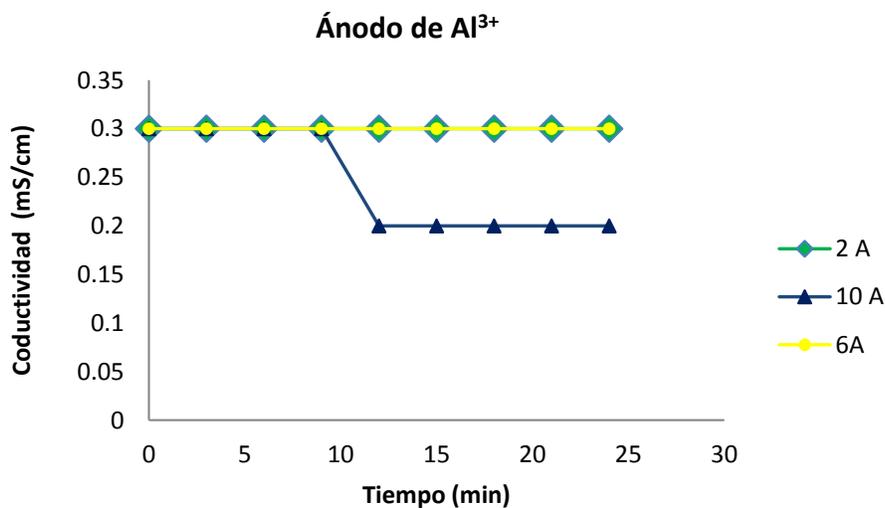


Fig. 6. Comportamiento de la Conductividad vs tiempo con ánodo de Aluminio.

En las figuras 5 y 6, se muestra como la conductividad en las intensidades 6 y 10 A tiene un comportamiento similar entre los primeros 9 min, después el comportamiento es diferente, mostrando que a 6 A permanece constante mientras que a 10 aumenta utilizando ánodo de Al, esto indica que a mayor corriente hay una mayor dificultad para transportar los iones que existen en la solución mientras que con ánodo de Fe disminuye, debido que a mayor intensidad de corriente el sistema de EC produce muchos más iones que se pueden estar aglutinando en la superficie del ánodo formando un efecto de polarización, haciendo que los iones formados se queden sobre la superficie del ánodo generando una mayor resistencia al transporte de los iones (García, 1994), lo que indique que no necesariamente quiere decir que se está presentando una mayor remoción de color. la conductividad es la capacidad numérica de la habilidad que presenta el sistema para transportar una corriente eléctrica, depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación (Rojas, 2009), en el proceso de EC, los iones que se forman como hidroxilos y cationes metálicos son atraídos entre ellos para formar con hidróxidos de metal desestabilizantes de la materia suspendida por lo tanto es normal el comportamiento de la conductividad en los dos tipos de ánodos sea casi constante.

Análisis de Consumo Energético

En la figura 7 se muestra el consumo energético requerido para llevar a cabo el proceso de EC, con ánodo de Hierro, durante los 24 minutos de tratamiento.

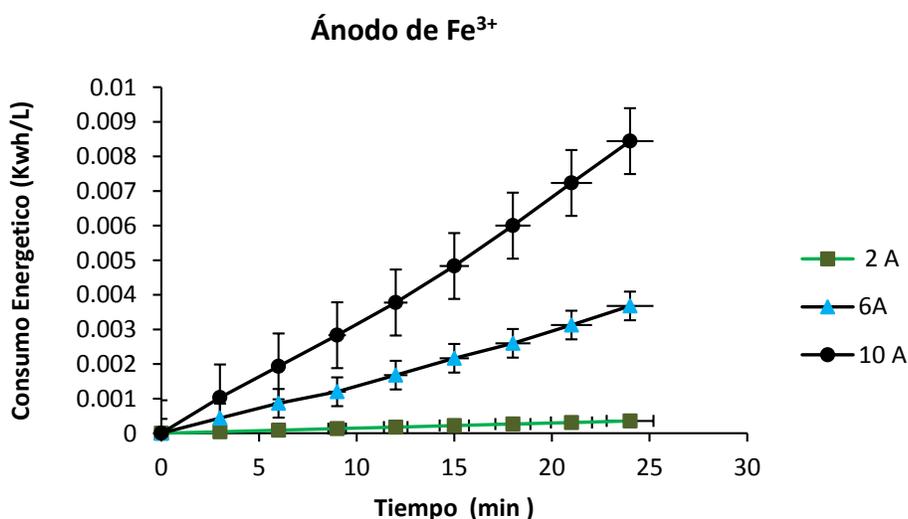


Fig. 7. Comportamiento del Consumo energético vs Tiempo con ánodo de Hierro.

La figura 8 muestra el consumo energético requerido para llevar a cabo el proceso de EC, con ánodo de Aluminio, durante los 24 minutos de tratamiento.

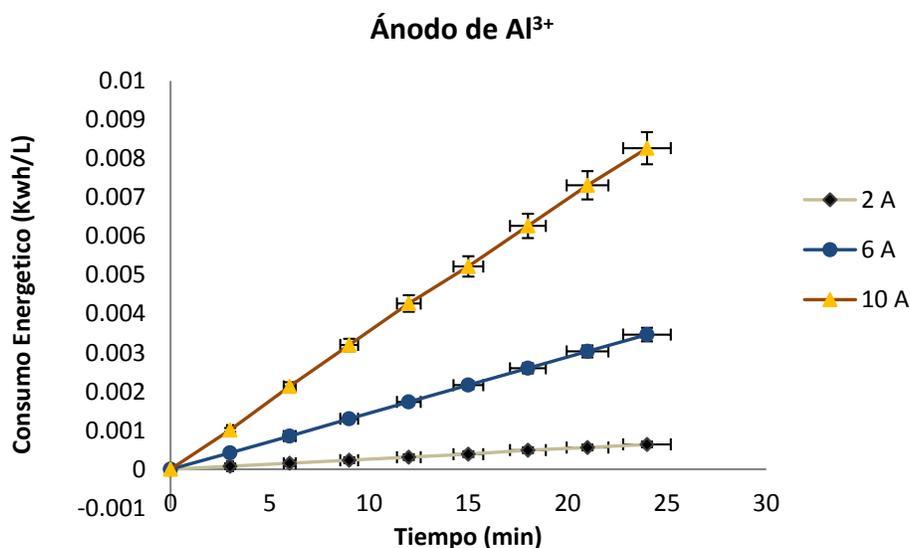


Fig. 8. Comportamiento del Consumo energético vs Tiempo con ánodo de Aluminio.

Las figuras 7 y 8 muestran como a medida que aumenta la intensidad de corriente aumenta el consumo energético independiente del tipo de ánodo utilizado, a 10 A se da el mayor consumo de energía lo que indica que el proceso en términos económicos no se sería muy rentable y resultaría demasiado costoso para una planta de potabilización de aguas, a 6A se muestra un menor consumo energético y los resultados de la investigación muestran que se da una buena remoción de color, pero con la intensidad de 2A muestra que a los primeros 3 min se logra una remoción de color superior al 80 % y presenta el menor consumo energético, de esta forma se debe tener en cuenta que el tiempo y la intensidad de corriente tienen un efecto significativo en el consumo energético pero deben ser escogidos de la mejor manera para no alterar los gastos del proceso y obtener la mejor remoción (Lehmann, 2011).

Análisis de Sólidos Disueltos Totales (SDT)

En la figura 9 se muestra el comportamiento de la cantidad de sólidos disueltos utilizando ánodo de Hierro a lo largo del tiempo. En la figura 10 se muestra el comportamiento de la cantidad de sólidos disueltos utilizando ánodo de Aluminio a lo largo del tiempo.

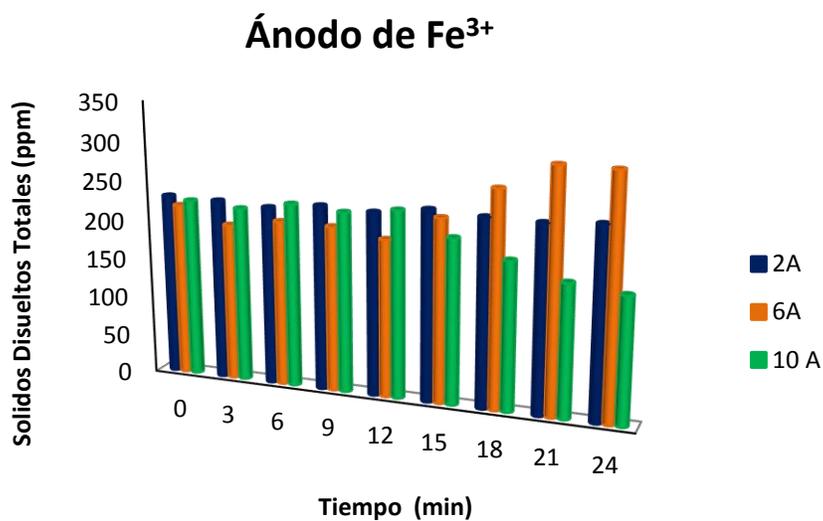


Fig. 9. Comportamiento de SDT vs Tiempo con ánodo de Hierro

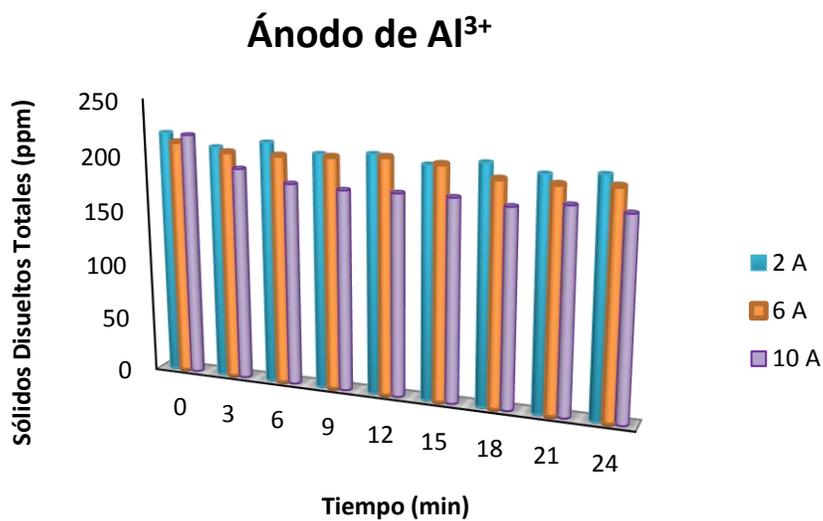


Fig. 10. Comportamiento de SDT vs Tiempo con ánodo de Aluminio

En las gráficas 9 y 10 se muestra como la cantidad de SDT muestra un comportamiento similar independiente del tipo de ánodo utilizado y a través del tiempo en las diferentes intensidades de corriente, Para tener una buena estimación de los SDT, se puede hacer una relación con la medida de conductividad, pues tiene una relación directa (Rojas, 2009), ya que la conductividad es la medida de la capacidad física para transportar los iones en solución y la cantidad de solidos totales responde a los iones disueltos más los iones suspendidos, lo cual se evidencia a lo largo del estudio con el análisis de la conductividad en el cual se mostraba un comportamiento similar y constante durante la EC en donde podemos concluir que con una conductividad entre 0.1 y 0.3 mS/cm se tiene una cantidad promedio de entre 185 ppm y 237 ppm de SDT.

Análisis de Remoción de Color

En la figura 11, se muestra un gráfico de superficies de respuesta en el cual se logra predecir algunos parametros para obtener buenos resultados de remocion el color con respecto al tiempo y a la intensidad de corriente utilizada.

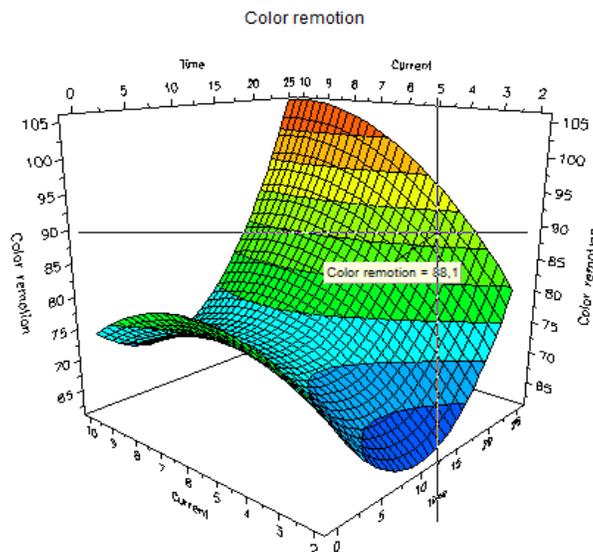


Fig. 11. Gráfico de superficie de respuesta vs intensidad de corriente y vs tiempo

La figura 11, nos muestra una predicción sobre los mejores parámetros para obtener una alta remoción en color con respecto al tiempo de electrolisis empleado (24 min) y la intensidad de corriente aplicada (2A, 6A, y 10A), de acuerdo a estos aspectos la mejor remoción de color se podría hallar a un tiempo de 12 min utilizando una intensidad de corriente de 6 A (sitio de corte), lo cual no está muy alejado de los resultados obtenidos a las mismas condiciones, reflejado en las figuras 12 y 13 mostradas a continuación.

En la figura 12, se muestra el porcentaje en remoción de color logrado utilizando ánodos de Hierro de acuerdo a las diferentes intensidades de corriente y el aumento del tiempo. En la figura 13, se muestra el porcentaje en remoción de color logrado utilizando ánodos de Aluminio y de acuerdo a las diferentes intensidades de corriente y el aumento del tiempo.

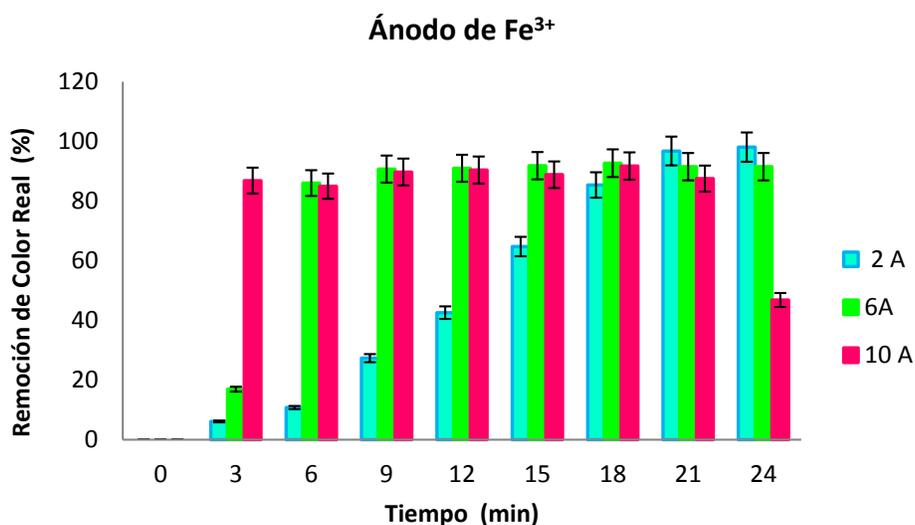


Fig. 12. Remoción de Color v.s Tiempo con ánodo de Hierro

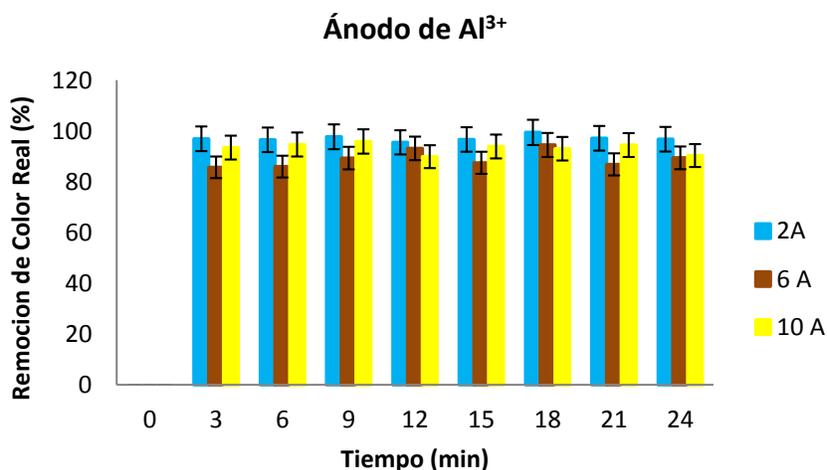


Fig.13. Remoción de Color v.s Tiempo con ánodo de Aluminio

En las Figuras 12 y 13, se muestra el porcentaje en la remoción de color, utilizando ánodo de Fe se evidencia que para que se tenga una alta remoción de color son necesarias intensidades de 6 y 10 Amperios, se logra en los primeros 6 min una remoción superior al 80%, y utilizando ánodo de Al y una intensidad de corriente de 2 A, se logra la mayor remoción en color del 96%, en los primeros 3 min de tratamiento, lo que implica un consumo energético menor, después de este punto el color se mantiene más o menos constante, utilizando el ánodo Fe con una intensidad de corriente de 2 A muestra a los 24 min una remoción del 98.1 % , lo cual es una muy buena remoción pero implica un tiempo de electrolisis mayor y una producción de Hidróxidos de hierro insolubles que le aportan menor apariencia de limpieza y claridad al agua, lo anterior nos muestra que la técnica de EC, es una muy buena alternativa de descontaminación de aguas residuales con color utilizando tiempo cortos e intensidades de corrientes bajas.

Conclusiones

- Utilizando ánodo de Al puede tener una alta remoción de color del 96% en un tiempo de 3 min de tratamiento de EC, mientras que utilizando ánodo de Fe se logra una remoción del 91% de color a los 12 minutos de tratamiento de EC.
- El ánodo de hierro presenta una resistividad de 9.71×10^{-8} Oh/m y el ánodo de aluminio tiene una resistividad de 2.65×10^{-8} Oh/m, significa que el transporte de la corriente eléctrica es mucho más fácil para el Al que para el Fe, requiriendo un mayor tiempo en el tratamiento de EC y reflejado en el tiempo necesario para obtener una disminución de color.
- La disminución de la turbidez con ánodo de Fe está directamente relacionada con el aumento en la intensidad de corriente, al aumentar en tiempo de EC, disminuyendo en un 64.1 % a los 6A y la disminución de la turbidez con ánodo de Al es del 70.45 % con una intensidad de corriente 6A.
- El proceso de Electrocoagulación es efectivo para la remoción de color y turbidez a bajas intensidades de corriente (2A) y tiempos cortos (entre 3 y 9 min) para los ánodos de Al y Fe.
- En las condiciones óptimas para remover color (3 min, 2 Amperios) por EC, se muestra que la remoción de la turbidez, es baja lo que indica que se debe hacer un tratamiento adicional para llegar a una mayor disminución de este parámetro y por ende llegar a una mayor descontaminación de cuerpos de agua con alta turbiedad.

Referencias bibliográficas

- Brillas, C.A.H. (2009) Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: a general review, *Applied catalysis b: environmental*, 105-145.
- Chen, G. (2004) Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and purification technology*, **38**, 11-41.

- Contreras, V.L. (2006) Fotooxidación con UV/H₂O₂ de aguas residuales. *XXII IACCHE (CIIQ) / V CAIQ*, **16**.
- García, J.F. (1994) Acumuladores electroquímicos. Fundamentos, Nuevos desarrollos y aplicaciones. Serie Electrotecnologías, 6. Ed., MacGraw Hill, Madrid, España.
- Lehmann, P.S. (2011) *Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de aguas mediante electrocoagulación*. Tesis Doctoral, Programa Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- Linares H.I., Martínez M.V., Barrera D.C., (2011) Oxidation of persistent organic matter in industrial wastewater by *ACI*, **2**(1), 21-36.
- Restrepo A., Arango Á., Garcés L. (2006) La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas; *Producción + limpia*, **1**(2),58-77
- Ricardo E. Palma, Goyes, J.M. (2013) Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil mediante oxidación electroquímica. *Revista colombiana de materiales*, **4**, 93-108 .
- Rojas, J.A. (2009) *Calidad del agua*, 3ª edición, Escuela colombiana de ingeniería, Colombia.
- Sepúlveda L., Palma C., Contreras E. (2006) Fotooxidación con UV/H₂O₂ de aguas residuales provenientes de una planta textil. Recuperado el 30 de mayo de 2014, desde:
<http://www.revistavirtualpro.net/vpro13/biblioteca/fotooxidacion-con-uv-h2o2-de-aguas-residuales-provenientes-de-una-planta-textil>
- Walters, A., Santillo, D., Johnston, P, (2005) *El tratamiento de textiles y sus repercusiones ambientales*, recuperado el 30 de mayo de 2014, desde:
<http://www.greenpeace.org/espana/global/espana/report/other/el-tratamiento-de-textiles-y-s.pdf>
- Xiaoning W., Jinping J., Yalin W. (2010) Electrochemical degradation of reactive dye in the presence of water jet cavitation. *Ultrasonics sonochemistry*, **17**(3), 515-520