

## GESTIÓN SUSTENTABLE DE RECURSOS HÍDRICOS

**Eliminación de materia orgánica en aguas residuales textiles mediante la aplicación de ozono.**

**Organic matter removal in textile wastewater by applying ozone.**

**Agustín Leiva Pérez<sup>1</sup>, Roy Leonardo Barre Zambrano, Sergio Santiago Alcívar Pinargote, Carlos Solórzano Solórzano y Joffre Andrade Candell**

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí «Manuel Félix López», Ecuador  
[r.leiva.uteg@hotmail.com](mailto:r.leiva.uteg@hotmail.com)

Recibido: 07/07/2018  
Aceptado: 20/11/2018  
Publicado: 28/12/2018

### RESUMEN

Se desarrolló el estudio de la oxidación de materia orgánica, medida como Demanda Bioquímica de Oxígeno de 5 días y Carbono Orgánico Total, mediante aplicación de ozono en reactores Batch completamente mezclados, con el objetivo de evaluar la capacidad oxidativa al aplicarse a las aguas residuales de la industria textil, considerando tiempos de reacción entre 10 y 60 minutos. Se utilizó un equipo Generador de Ozono SEFILTRA, que se caracteriza por un flujo aire de 2 dm<sup>3</sup>/min, concentración de ozono de 9.50 mg/dm<sup>3</sup>, una producción de O<sub>3</sub> de 19 mg/min y un % peso de 0.8. Se mezclaron 30 dm<sup>3</sup> de los efluentes de las empresas textiles «Jhonatex» y «Textil Buenaño», ubicadas en Tungurahua y «Modatex» en Azuay. En total, 90 dm<sup>3</sup>, a los cuales se les realizaron tres repeticiones de análisis después de la mezcla, utilizando los valores medios como iniciales del proceso de ozonización. Se seleccionaron tiempos de reacción entre 10 y 60 minutos, repitiéndose tres veces cada proceso. Para cada tiempo de ozonización el reactor trabajó con 5 dm<sup>3</sup> en cada una de las tres réplicas con cada tiempo. Los parámetros indicadores de la contaminación antes mencionados, mostraron niveles oxidativos satisfactorios, alrededor del 90% de remoción, a los 50 minutos de reacción, cumpliéndose con la restricción normativa vigente para las descargas en alcantarillado y cuerpos de agua dulce. Ambos resultaron oxidados vía ozonización, según comportamientos polinómicos de segundo grado, con coeficientes de correlación por sobre los 0.97.

**PALABRAS CLAVE:** ambiente, contaminación, oxidación.

### ABSTRACT

The study of the oxidation of organic matter, measured as the 5-day Biochemical Oxygen Demand and Total Organic Carbon, was developed through the application of ozone in fully mixed Batch reactors, with the objective of evaluating the oxidative capacity when applied to the wastewater of the textile industry, considering reaction times between 10 and 60 minutes. A SEFILTRA Ozone Generating set was used, which is characterized by an air flow of 2 dm<sup>3</sup> / min, ozone concentration of 9.50 mg / dm<sup>3</sup>, an O<sub>3</sub> production of 19 mg / min and a weight% of 0.8. 30 dm<sup>3</sup> of the effluents from the textile companies

«Jhonatex» and «Textil Buenaño», located in Tungurahua and «Modatex» in Azuay, were mixed. In total, 90 dm<sup>3</sup>, to which three repetitions of analysis were performed after mixing, using the mean values as initials of the ozonation process. Reaction times between 10 and 60 minutes were selected, each process being repeated three times. For each ozonation time, the reactor worked with 5 dm<sup>3</sup> in each of the three replicates with each time. The aforementioned indicator parameters of contamination showed satisfactory oxidative levels, around 90% removal, after 50 minutes of reaction, complying with the current regulatory restriction for discharges into sewers and freshwater bodies. Both were oxidized via ozonation, according to second degree polynomial behaviors, with correlation coefficients above 0.97.

**KEYWORDS:** environment, oxidation, pollution.

## INTRODUCCIÓN

Entre las tecnologías reportadas para el tratamiento de aguas residuales, particularmente textiles, se encuentran los procesos biotecnológicos, la precipitación química, la coagulación – floculación – sedimentación, de membranas, la adsorción, el proceso Fenton y las técnicas electroquímicas, todos los cuales se resumen a continuación:

- a) *Procesos biotecnológicos:* El uso de microorganismos en la oxidación de aguas residuales que contienen tintes sintéticos es una opción interesante por las ventajas derivadas del tratamiento biológico, pues son procesos relativamente económicos y pueden permitir la degradación parcial o total de los componentes iniciales. Sin embargo, un proceso convencional muy empleado como el sistema de lodos activados aerobios es incapaz de eliminar, eficientemente, el colorante y los compuestos tóxicos orgánicos e inorgánicos, que pueden estar presentes en los residuos de procesos textiles. En parte el bajo rendimiento se atribuye a la adsorción sobre los lodos. Mediante los anaerobios se consiguen elevados rendimientos de eliminación para una gran variedad de colorantes, aunque la cinética del proceso es considerablemente lenta (Cortázar *et al.*, 2012).
- b) *Precipitación química; intercambio iónico; oxidación – reducción:* Se eliminan metales pesados que pudieran estar contenidos en las aguas residuales de procesos textiles. Se reducen tanto la toxicidad como la solubilidad. En el intercambio iónico se emplean resinas de intercambio catiónico, que se clasifican en fuertemente o débilmente ácidas (Simón, 2008).
- c) *Coagulación – floculación – sedimentación:* Consiste en el suplemento de polielectrolitos o floculantes inorgánicos, como sales de hierro o aluminio, que floculan adheridos a las partículas de colorantes, propiciándose la separación mediante sedimentación (Andía, 2000).
- d) *Tecnología de membranas:* A través de ellas se realiza la separación eficiente de las partículas de colorante y otros compuestos de dimensiones superiores al tamaño de poro de la membrana utilizada. Prioritariamente se emplean membranas de ultrafiltración, ósmosis inversa y nanofiltración (Ayala, Peñuela y Montoya, 2006).
- e) *Adsorción:* Rico (2015) diseñó un proceso de adsorción para el tratamiento de aguas residuales de baños de tintura mediante ciclodextrinas; se basa en la retención física de las moléculas de colorante en la superficie del adsorbente.
- f) *Proceso Fenton:* El peróxido de hidrógeno y el sulfato ferroso (reactivo Fenton), en medio ácido, propicia la oxidación del OH, de elevada reactividad, que se obtiene a través de la descomposición catalítica del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a valores de pH suficientemente bajos (Castro y Durán, 2014).
- g) *Técnicas electroquímicas:* Se basan en la hidrólisis del colorante a través de agentes secundarios generados electrolíticamente mediante la aplicación de un potencial. Los procesos

son limpios, operan a baja temperatura y en muchos casos no requieren la adición de productos químicos a las aguas residuales. No obstante, su alto consumo de energía y la generación de compuestos secundarios por reacciones paralelas disminuyen la potencialidad del método. Dentro de las posibilidades que ofrece la Electroquímica en el tratamiento de aguas residuales se ha considerado la eliminación de metales pesados, colorantes materia orgánica, difícilmente tratables por métodos biológicos (elevados valores de DQO, presencia de fenoles, colorantes, etc.), como es el caso de los residuos líquidos textiles (LEQA – Grupo de Electroquímica Aplicada y Electrodiálisis, 2018).

Romero, Rodríguez y Masó (2016), realizaron la caracterización de los residuos líquidos generados en una industria textil cubana, la que se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Características de las aguas residuales de textilera según monitoreo del año 2015 y valores reportados en la normativa cubana NC 27:1999.

Parámetro	Valores hallados	NC 27:1999
pH	9.5	6 – 9
Temperatura (°C)	35.5	50
Oxígeno disuelto (mg/dm <sup>3</sup> )	7.8	-----
Sólidos totales (mg/dm <sup>3</sup> )	5000	-----
Sólidos sedimentables (mg/dm <sup>3</sup> )	NA	<10
DBO <sub>5</sub> (mg/dm <sup>3</sup> )	300	<300
DQO (mg/dm <sup>3</sup> )	522	<700
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup> )	304	-----
Dureza (mg CaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup> )	82	-----
NA: no apreciable		

**Fuente:** Romero, Rodríguez y Masó (2016).

Es conocido que el gas ozono (O<sub>3</sub>) constituye un estado alotrópico del oxígeno (O<sub>2</sub>), generado por el paso de la corriente eléctrica a través de un conductor, preferentemente metálico. Para la utilización de su propiedad como agente oxidante enérgico se han desarrollado y comercializado una gran variedad de equipos productores, que incluso, combinan líquidos con la corriente de aire (contiene un 20% de O<sub>2</sub> gaseoso) o de oxígeno ozonizada, que provoca una oxidación enérgica de los diferentes tipos de materiales contenidos en dichos líquidos.

Leiva *et al.* (2016) reportaron la eliminación de color en el licor negro residual, no usado como combustible, en la operación de extracción de la pulpa para papel de bagazo de caña, que poseen altos contenidos de polifenol (lignina), obteniendo resultados de entre 53% y 94% de eliminación del color entre 10 y 60 minutos de oxidación con ozono; y entre 46 y 90% de remoción de Demanda Química de Oxígeno en dichos rango de tiempo, reportándose un decremento de la eficiencia de remoción, según se incrementó la concentración de Sólidos Suspendedos Totales desde 50 hasta 300 mg/dm<sup>3</sup>.

De acuerdo con Bolaños (2010), Romero *et al.* (2016) y Leiva *et al.* (2018), las aguas residuales de las operaciones textiles se asocian con altos contenidos de color, DQO y otros contaminantes de las aguas superficiales como el Carbono Orgánico Total, Nitrógeno, Grasas y aceites, entre otros. Asimismo, López y Crespi (2015) nombraron una serie de parámetros indicadores de contaminación, particularmente del

agua, como: Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Carbono Orgánico Total, sólidos suspendidos, conductividad eléctrica, color, toxicidad, nitrógeno total (Kjeldahl), fósforo total y agentes tensioactivos.

Los procesos empleados en el tratamiento de los residuos líquidos bajo estudio son complejos y sobre todo costosos, debido a sus características. Por ejemplo, una tecnología empleada con buena eficiencia en la industria textil algodonera de tintura de género de punto en Barcelona (España) está compuesta por procesos de homogeneización, lodos activados, pero con adición de polímero decolorante, filtración a través de un medio compuesto por sílex y antracita, micro filtración seguida de ultra filtración con membranas en espiral y, la ósmosis inversa a continuación de la ultrafiltración (López y Crespi, 2015); como es sabido, particularmente los dos últimos procesos son costosos para el objetivo deseado.

El propósito de la investigación realizada fue la evaluación del proceso de ozonización como oxidante de las aguas residuales de industria textil, mediante el uso de un generador de ozono, para la eliminación de la materia orgánica como Carbono Orgánico Total (COT) y Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_{5a, 20^{\circ}C}$ ). De esta forma la estrategia seguida apunta a analizar la relación entre los tiempos de ozonización y las eficiencias de remoción de los parámetros indicadores de la contaminación, COT y  $DBO_5$ , lo cual impacta positivamente a la ingeniería ambiental en el campo del tratamiento de aguas residuales difíciles de estabilizar, para reducir sus impactos al entorno.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó un equipo Generador de Ozono de la firma madrileña SEFILTRA, que utiliza aire como insumo de  $O_2$  y cuyas características principales de interés para el estudio se muestran en la tabla 2 y que ya fue empleado por Leiva *et al.* (2016, 2018), presentándose el flujo de aire alimentado, la concentración de ozono producida y el % en peso del mismo, en el caudal de salida del equipo.

**Figura 1.** Equipo Generador de Ozono de la empresa dedicada a la purificación de fluidos SEFILTRA.



**Fuente:** SEFILTRA (2018).

Asimismo, se dispuso de:

- Equipo de filtración común.
- Filtros para análisis gravimétrico: AP40 Millipore.
- Mangueras plásticas de PVC de 0,5 cm de diámetro interior.
- Reactor batch plástico oscuro de forma cilíndrica circular recta, de 8 dm<sup>3</sup> de volumen total (1.27 dm de diámetro de la base y 2 dm de altura) con entrada y salida de gases y toma de muestra en el punto central de su altura efectiva (3.2 dm), algo más pequeño que el empleado por Leiva *et al.* (2016) en la ozonización de licor negro residual de la producción de pulpa y papel de bagazo de caña.

Para propiciar la representatividad de la muestra de la población de residuos líquidos a tratar, se mezclaron 30 dm<sup>3</sup> de los efluentes de cada una de las empresas textiles Jhonatex ubicada en Leonardo Pérez 01-90 y Homero Hidrovo, Ambato, Tungurahua; Textil Buenaño, en la calle cuatro del Parque industrial de la misma ciudad y Modatex, situada en Bolívar y Mariano Cuevas esq. Cuenca, Azuay.

En total, 90 dm<sup>3</sup>, a los que se les realizaron tres repeticiones de análisis después de la mezcla (muestras A, B y C) (Tabla 3), utilizando los valores medios como iniciales del proceso de ozonización. Se seleccionaron tiempos de ozonización de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos, repitiéndose tres veces cada proceso, nominados como P<sub>10</sub>, P<sub>20</sub> y P<sub>30</sub>, P<sub>40</sub>, P<sub>50</sub> y P<sub>60</sub>, respectivamente.

**Tabla 2.** Características principales utilizadas del equipo Generador de Ozono SEFILTRA.

Flujo aire (dm <sup>3</sup> /min)	c(O <sub>3</sub> ) (mg/dm <sup>3</sup> )	Producción de O <sub>3</sub> (mg/min)	% Peso
2	9.50	19	0.8

Fuente: SEFILTRA (2018).

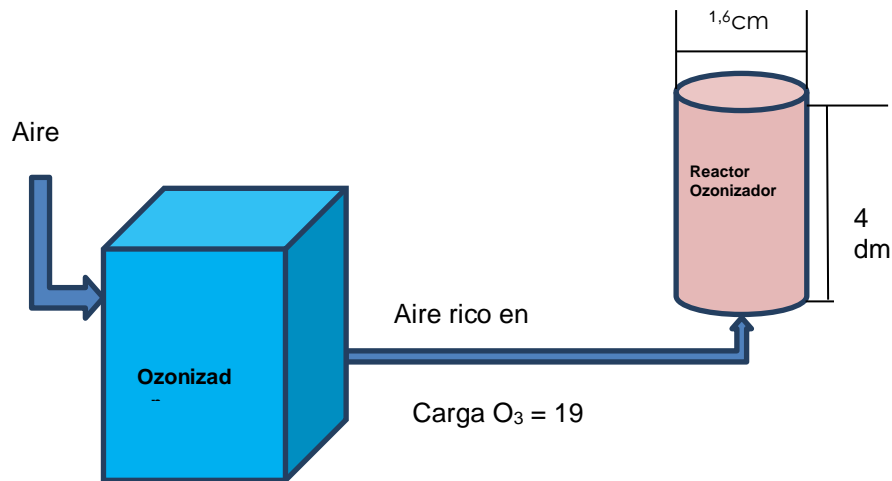
Para cada tiempo de ozonización el reactor trabajó con 5 dm<sup>3</sup> de volumen en cada una de las tres réplicas con cada tiempo. De esta forma, en el reactor siempre quedaron 3 dm<sup>3</sup> de volumen libre para evitar pérdidas por derrames debido a la espuma. En la figura 2 se muestra un esquema del reactor que fue empleado en los seis procesos batch, almacenándose en frío, el líquido que va quedando sin usar hasta el batch en función y que se utilizó después en los restantes. Todos los análisis se realizaron con base en Eaton *et al.* (2005). En la tabla 3 se presentan las características principales del agua residual textil, ya mezclada, que se utilizó en la evaluación del proceso de ozonización, es decir, las concentraciones de COT y de DBO<sub>5</sub> para cada una de las tres muestras, con sus correspondientes valores medios, desviaciones estándar y coeficientes de variabilidad.

**Tabla 3.** Características principales del agua residual textil mezclada utilizada en los tratamientos basados en la ozonización.

Parámetro	Unidad	Muestra A	Muestra B	Muestra C	Media	DE	CV (%)
COT	mg/dm <sup>3</sup>	548	532	501	527	23.90	4.53
DBO <sub>5</sub>		713	731	695	713	18	2.52

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.** Esquema general del proceso de ozonización.



Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 4 se presentan los resultados del proceso de oxidación mediante ozonización al término de los primeros 10 minutos de operación (tratamiento denotado como P<sub>10</sub>), a través de la eficiencia media de remoción (tres repeticiones) del Carbono Orgánico Total.

**Tabla 4.** Resultados de la ozonización al término de los 10 minutos de reacción.

Tratamiento Eficiencias de Remoción	P <sub>10-1</sub>	P <sub>10-2</sub>	P <sub>10-3</sub>	MEDIA	D.E.	C.V. (%)
%R <sub>COT</sub>	31	29	34	31.33	2.52	8.04
%R <sub>DBO5</sub>	24	27	25	25.33	1.53	12.03

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que al cabo de dicho tiempo de reacción, la eficiencia de eliminación del COT solo alcanza el 31%; en cuanto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno de 5 días, el promedio de la eficiencia de remoción para dicho parámetro fue también relativamente baja, es decir, 25%. O sea, que un tiempo inicial de 10 min no es suficiente para remover significativamente las concentraciones de estos parámetros indicadores de la contaminación.

Los valores obtenidos para el coeficiente de variabilidad y, por lo tanto para la desviación estándar de las eficiencias de eliminación de ambos parámetros indicadores de la contaminación, COT y DBO<sub>5</sub>, 8% y 12% respectivamente, pueden considerarse suficientemente bajos como para dar credibilidad a la estrecha distribución de las cifras alrededor de las medias. Estos resultados son análogos a los obtenidos por Leiva *et al.* (2018), también para residuos líquidos de la industria textil, con relación a la DBO<sub>5</sub>, aunque en dicho estudio no se investigó el comportamiento de la eficiencia de remoción del COT. En el referido trabajo de no se tuvo en cuenta al COT debido al carácter preliminar del mismo, tomándose la decisión

de considerarlo en el resto de investigaciones de la serie de ozonización de residuos líquidos industriales de baja biodegradabilidad.

En la tabla 5 se presentan los resultados del proceso de oxidación mediante ozonización al término de 20 min de operación (tratamiento denotado como P<sub>20</sub>). Similarmente a como ya fue analizado, para el tiempo de 10 min de reacción aún se comportan bajas las eficiencias de remoción tanto de COT como de DBO<sub>5</sub>, es decir, alrededor de 40 % para el primer parámetro y, 33% para el segundo.

**Tabla 5.** Resultados de la ozonización al término de los 20 minutos de reacción.

Tratamiento Eficiencias de Remoción	P <sub>20-1</sub>	P <sub>20-2</sub>	P <sub>20-3</sub>	MEDIA	D.E.	C.V. (%)
%R <sub>COT</sub>	38	41	40	39.67	1.53	3.86
%R <sub>DBO5</sub>	29	36	34	33	3.61	10.94

Fuente: Elaboración propia.

También se colige lo relacionado con la variabilidad de los resultados, particularmente para el COT (coeficiente de variación tan bajo como 3.86%); mientras que, para la DBO<sub>5</sub>, estuvo cerca del 11%, lo cual se puede atribuir a la más baja precisión del análisis del primero, realizado con un equipo suficientemente automatizado y por lo tanto preciso, que depende mucho menos de la actuación humana que en el caso del segundo parámetro indicador (DBO<sub>5</sub>).

La tabla 6 muestra datos sobre las eficiencias de remoción de COT y de DBO<sub>5</sub> a los 30 minutos de ozonización. El comportamiento es similar al discutido previamente para los tiempos de reacción de 10 y 20 min, aunque ya los porcentajes de eliminación de ambos parámetros alcanzan cifras significativamente más altas, 73% y 65%, con variabilidades suficientemente bajas. La conducta de la DBO<sub>5</sub> sigue siendo similar a la reportada por Leiva *et al.* (2018), aunque sin conocimiento acerca de la correspondiente al COT, que como se dijo anteriormente, no fue estudiado en dicha investigación.

**Tabla 6.** Resultados de la ozonización al término de los 30 minutos de reacción.

Tratamiento Eficiencias de Remoción	P <sub>30-1</sub>	P <sub>30-2</sub>	P <sub>30-3</sub>	MEDIA	D.E.	C.V. (%)
%R <sub>COT</sub>	73	70	75	72.67	2.52	3.47
%R <sub>DBO5</sub>	62	67	67	65.33	2.89	4.42

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7 se aprecian los datos correspondientes a los 40 minutos de reacción oxidativa mediante aplicación de ozono. Comienza la etapa en que las eficiencias de remoción continúan en aumento, pero las razones de dichos incrementos son apreciablemente menores que en los momentos anteriores. Se manifiesta el mismo comportamiento tanto para el COT como para la DBO<sub>5</sub>. Se mantienen la superioridad de los valores del primero con respecto al segundo parámetro. Debe considerarse que contribuyendo al conjunto del COT hay compuestos que no son fácilmente oxidables en el proceso de análisis de la DBO<sub>5</sub>, debido a su origen biológico, lo que se atribuye como explicación a las diferencias entre estos resultados.

**Tabla 7.** Resultados de la ozonización al término de los 40 minutos de reacción.

Tratamiento Eficiencias de Remoción	P <sub>40-1</sub>	P <sub>40-2</sub>	P <sub>40-3</sub>	MEDIA	D.E.	C.V. (%)
%R <sub>COT</sub>	91	89	93	91	2	2.20
%R <sub>DBO5</sub>	85	86	83	84.67	1.53	1.81

Fuente: *Elaboración propia.*

En la tabla 8 se muestran los resultados correspondientes a los 50 min de tiempo de reacción ozono – materia orgánica. Se observa que, a pesar del incremento de los valores de las eficiencias de remoción de Carbono Orgánico Total, así como de Demanda Bioquímica de Oxígeno de cinco días, ya este no es significativo, pensándose en la probable no valía de la continuidad del tratamiento, desde el punto de vista económico, aunque no químico. Se mantienen los valores bajos del coeficiente de variabilidad como en los casos anteriores.

**Tabla 8.** Resultados de la ozonización al término de los 50 minutos de reacción.

Tratamiento Eficiencias de Remoción	P <sub>50-1</sub>	P <sub>50-2</sub>	P <sub>50-3</sub>	MEDIA	D.E.	C.V. (%)
%R <sub>COT</sub>	94	96	96	95.33	1.15	1.21
%R <sub>DBO5</sub>	89	88	90	89	1	1.12

Fuente: *Elaboración propia.*

En la tabla 9 se presentan los resultados de la ozonización al término de los 60 minutos de reacción estabilizadora de la materia orgánica contenida en las muestras de residuos líquidos de las operaciones textiles. Ya prácticamente no existen diferencias significativas entre las eficiencias de eliminación de los dos parámetros indicadores de la contaminación considerada, a los 50 min y a la hora de tratamiento oxidativo. Es decir, que en el batch de 50 minutos puede darse por terminado el proceso, con eficiencias medias de remoción de COT en los alrededores de 95% y, cerca del 89% para la DBO<sub>5</sub>; al menos este último valor concuerda por el reportado por Leiva *et al.* (2018), para licores negros residuales de la industria de papel y cartón que utilizan el bagazo de caña como materia prima.

**Tabla 9.** Resultados de la ozonización al término de los 60 minutos de reacción.

Tratamiento Eficiencias de Remoción	P <sub>60-1</sub>	P <sub>60-2</sub>	P <sub>60-3</sub>	MEDIA	D.E.	C.V. (%)
%R <sub>COT</sub>	94	96	96	95,33	1,15	1,21
%R <sub>DBO5</sub>	89	88	90	89,00	1,00	1,12

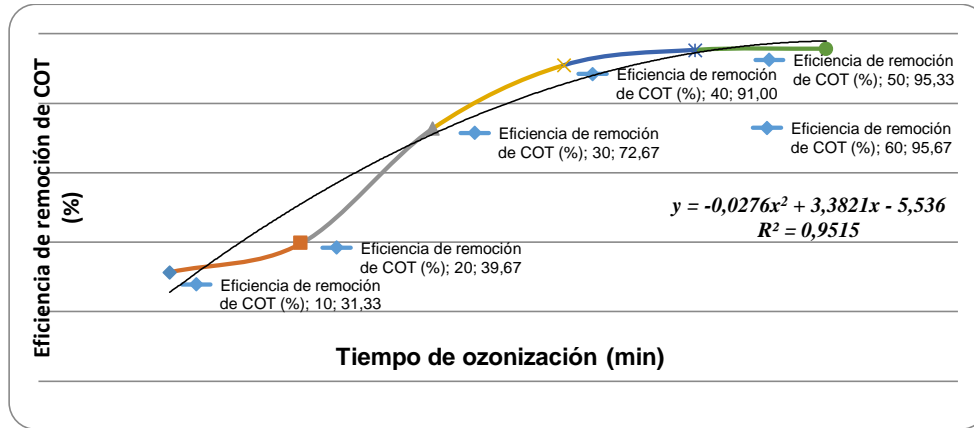
Fuente: *Elaboración propia.*

En la gráfica de la figura 3 se muestra el comportamiento de la eficiencia de remoción del Carbono Orgánico Total, apreciándose que durante los primeros 30 minutos de oxidación, es decir, en el tercer trío de reactores batch, su valor se incrementa hasta algo menos del 73%; a continuación, siguiendo con buena aproximación los aumentos se producen con reducción paulatina de la pendiente de la curva,



hasta llegar al 95% de eliminación, lo cual se mantuvo en el conjunto de los tres reactores correspondientes a los 60 minutos de reacción oxidativa de la materia orgánica con el ozono.

**Figura 3. Eficiencia de remoción de Carbono Orgánico Total.**



Fuente: *Elaboración propia.*

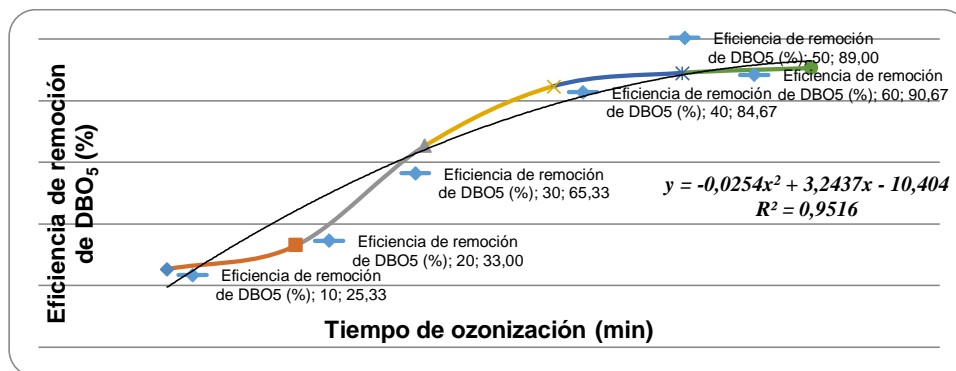
En general, la curva de eficiencia de remoción de COT versus el tiempo de ozonización se corresponde, en su mejor ajuste, con una función polinómica de segundo grado del tipo:

$$y = -0.0276x^2 + 3.3821x - 5.536$$

Con un coeficiente de correlación de 0.9754; que viene siendo la raíz cuadrada del valor reportado en la gráfica, de 0.9515 ( $R^2$ ) y, que aparece en trazado color negro.

Teniendo en cuenta el costo del proceso de ozonización, sería aceptable considerar un tiempo de ozonización de 40 min, con más de 90 % de remoción de Carbono Orgánico Total.

**Figura 4. Eficiencia de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno de 5 días.**



Fuente: *Elaboración propia.*

En la gráfica de la figura 4 se aprecia el comportamiento de la eficiencia de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de 5 días, medida a 20°C, el cual tiene similitudes con el del Carbono Orgánico Total, anteriormente analizado, con la diferencia de que los valores máximos, no superan el 91%. Es de

suponer que, como ya se explicó, que hay compuestos químicos poco susceptibles a la oxidación biológica, pero aptos a la oxidación química, al emplear un oxidante tan enérgico como el ozono; el que a pesar de su corto tiempo de duración como  $O_3$  (la unión de tres átomos de oxígeno) rompiéndose la molécula en una de  $O_2$  y un átomo de oxígeno,  $O$ , es capaz de oxidar una gran variedad de agentes químicos contaminantes.

En general, la curva de eficiencia de remoción de  $DBO_5$  versus el tiempo de ozonización, se corresponde, en su mejor ajuste, con una función polinómica de segundo grado del tipo:

$$y = -0.0254x^2 + 3.2437x - 10.404$$

Con un coeficiente de correlación de 0.9755; que viene siendo la raíz cuadrada del valor reportado en la gráfica de 0.9516 ( $R^2$ ) y, que aparece en trazado color negro.

Teniendo en cuenta el costo del proceso de ozonización, también, al igual que con el COT, sería aceptable considerar un tiempo de ozonización de 50 minutos, con el 89% de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno.

Aunque no fue objeto del trabajo, cualitativamente se pudo apreciar una reducción satisfactoria del color, uno de los parámetros típicos a observar en residuos líquidos textiles, quedando el estudio cuantitativo de la decoloración como propósito de una investigación a futuro inmediato. De otra parte, para la  $DBO_5$ , las normas generales para descarga de efluentes, tanto al sistema de alcantarillado como a los cuerpos de agua indican un máximo de 100 mg/dm<sup>3</sup>. En este caso, el valor de concentración de este parámetro normalmente exhibido por este tipo de residuo está en los alrededores de los 730 mg/dm<sup>3</sup>, por lo que para un 89% de eficiencia de remoción al cabo de los 50 min implica un vertimiento con alrededor de 80 mg/dm<sup>3</sup>, lo cual cumple con la norma, según el LIBRO VI ANEXO 1 del TULSMA.

En cuanto al COT, la norma correspondiente para descargas en agua dulce, a partir de un valor típico para residuos líquidos textiles de 548 mg/dm<sup>3</sup> y el porcentaje de eliminación obtenido del 95%, la descarga contendría 27 mg/dm<sup>3</sup> de COT. Sin embargo, la norma no establece valor máximo alguno para este parámetro.

## CONCLUSIONES

El proceso de oxidación que emplea al ozono como agente oxidante rindió resultados satisfactorios tanto para el Carbono Orgánico total como para la Demanda Bioquímica de Oxígeno de cinco días, medida a 20°C; obteniéndose eficiencias de remoción de ambos parámetros de casi 96% para el primero y de casi 91% para el segundo, aunque por razones únicamente económicas la operación puede darse por concluida, entre los 40 y 50 min de tiempo de reacción, siempre que se observen las condiciones de flujo y concentración de ozono, suministradas por el equipo utilizado en este estudio.

El comportamiento del proceso se comportó, con un coeficiente de ajuste apreciable, por sobre 0.97 para la eliminación de los dos parámetros estudiados, siguiendo una curva polinómica de segundo grado del tipo  $y = -Ax^2 + Bx - C$ . Según la norma vigente, después del tratamiento ejecutado, el líquido a verter en cuerpos de agua dulce cumple con la norma vigente, en cuanto a  $DBO_5$ , aunque sin establecer criterios para COT, aunque el porcentaje de eliminación del mismo, es elevado, (95%).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. Documento técnico. Planta de Tratamiento de Agua SEDAPAL. <https://cutt.ly/evnKON7>
- Ayala, M., Peñuela, G. y Montoya, J. (2006). Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 38, 53 – 63. <https://www.redalyc.org/pdf/430/43003805.pdf>
- Bolaños, R.A. (2010). *Propuesta de recuperación del agua residual proveniente de la industria textil*. [Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/61/2/10135820.pdf>
- Castro, L. y Durán, J. (2014). Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada. *Tecnología en Marcha*, 27(2), 40-50. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v27n2/a05v27n2.pdf>
- Cortázar, A., González, C. A., Coronel, C., Escalante, J. A., Castro, J., y Villagómez, J. R. (2012). Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 28(2), 187–199. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-29792012000200009&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-29792012000200009&script=sci_arttext&tlng=pt)
- Eaton, A.D., Clesceri, L.S., Franson, M.A.H., Rice, E.W. & Greenberg, A.E. (ED). (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th Ed. American Public Health Association.
- Leiva, A., Macías, E., Zambrano, T., Barre, R., Montesdeoca, R. y Andrade, J. (2018). Ozonización de residuos líquidos textiles para remoción de Sólidos Suspendidos Totales, Demandas Química y Bioquímica de Oxígeno, Grasas y Aceites. *European Scientific Journal*, 14(3), 40-47. <http://eujournal.org/index.php/esj/article/view/10430/9936>
- Leiva, A., Peñafiel, S.E., Andrade, J.A., Aveiga, A.M., Brito, G.G., Zambrano, T.R. (2016). Estudio preliminar sobre la decoloración del residual líquido de la producción de papel mediante ozonización. *European Scientific Journal*, 12(9), 164-171. <https://cutt.ly/AynCuV7>
- LEQA – Grupo de Electroquímica Aplicada y Electrodiálisis. (2018, 20 de enero). *Tratamiento de aguas residuales por métodos electroquímicos*. Universidad de Alicante. <https://web.ua.es/es/leqa/tratamiento-de-aguas-residuales-por-metodos-electroquimicos.html>
- López, V. y Crespi, M. (2015). Gestión de los efluentes de la Industria Textil. *Cuaderno Tecnológico 18*. Instituto de Investigación Textil y Cooperación Industrial de la Universidad Politécnica de Cataluña. <https://cutt.ly/yynValc>
- Rico, A. (2015). *Diseño de un proceso de adsorción para el tratamiento de aguas residuales de baños de tintura mediante ciclodextrinas*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia]. <http://hdl.handle.net/10251/56909>

- Romero, T de J., Rodríguez, H. y Masó, A. (2016). Caracterización de las aguas residuales generadas en una industria textil cubana. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(3), 46-58. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382016000300004](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000300004)
- Romero, T.D.J., Rodríguez, H., y Masó, A. (2016). Caracterización de las aguas residuales generadas en una industria textil cubana. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(3), 46-58.
- SEFILTRA. (2018). Productos. Consultado el 5 de febrero de 2018. <https://www.sefiltra.com/productos/>
- Simón, E. (2008, 2 de febrero). *Los metales pesados en las aguas residuales*. Madridmasd. <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698>