

---

# Optimización del proceso de ultrafiltración de efluentes de una industria de cereales

Jesús Escobar Jiménez<sup>1\*</sup>, Claudia Muro Urista<sup>2</sup>, Jesús Castellanos Estupiñán<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agrícolas Universidad Autónoma del Estado de México. El Cerrillo Piedras Blancas, C.P. 50200 Toluca, Estado de México. <sup>2</sup>División de Estudios de Posgrado e Investigación. Instituto Tecnológico de Toluca. Av. Tecnológico s/n, col. Ex-rancho La virgen, C.P. 52140 Metepec, Estado de México. <sup>3</sup>Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

---

*Optimization process of ultrafiltration effluents from grains industry*

*Optimització del procés de ultrafiltració d'efluents d'una indústria de cereals*

*Recibido: 16 de octubre de 2010; revisado: 10 de abril de 2011; aceptado: 28 de abril de 2011*

## RESUMEN

La Metodología de Superficie de Respuesta fue utilizada en la optimización del proceso de filtración con membranas para tratar efluentes de un sector productor de cereales localizado en México. Dos membranas con umbral de corte de 150 y 15 KDa se probaron para maximizar el valor de la densidad de la filtración en la recuperación de agua para reutilización en actividades industriales. El efluente provenía de una planta de tratamiento experimental a escala piloto. Entre sus características destacan los residuos de una combinación de dos colorantes sintéticos de uso alimenticio, Azul Brillante y tartrazina produciendo varias capas de coloración verde, además de presencia de sales y materia orgánica con valores de DQO aún altos para considerar la reutilización del agua en estas condiciones. Con las variables de operación óptimas, se alcanzó la mayor eficiencia utilizando la membrana de 15 KDa, produciendo mejores flujos de agua, superando el tiempo de operación y retardando la polarización o depósito de partículas en su superficie. Con respecto a la calidad del agua filtrada, la DQO disminuyó considerablemente en un 96%, se eliminaron los colorantes en un 99% y se eliminaron las sales. Asegurando con estos resultados, el buen funcionamiento de la membrana en un periodo de tiempo mayor para recuperar agua de la reutilización.

**Palabras clave:** Recuperación de agua, Membranas, Optimización, Colorantes

## SUMMARY

Wastewater from cereal industry was filtered through the membranes a molecular weight cut-off of 150 and 15 KDa to remove residues of combination of two synthetic food colorants: brilliant blue and tartrazine, which produced several green curtains and conductivity high after a biological treatment process. The membrane filtration was optimized using Response Surface Methodology (SRM). The 15 KDa membrane reached greater efficiency in clean water pro-

duction, improving continue filtration time in 60 min. The fouling membrane was delayed and improved permeation using 3.83 bar transmembrane pressure. About quality water, organic matter and colorants were removed up to a 99%, salts also were eliminated in 71 %.

**Keywords:** Recovery of water, Membranes, Optimization, coloring

## RESUM

La Metodología de Superficie de Respuesta va ser utilitzada en l'optimització del procés de filtració amb membranes per tractar efluentes d'un sector productor de cereals localitzat a Mèxic. Dues membranes amb llindar de tall de 150 i 15 KDa van ser provades per maximitzar el valor de la densitat de la filtració en la recuperació d'aigua per reutilització en activitats industrials. L'efluent provenia d'una planta de tractament experimental a escala pilot. Entre les seves característiques destaquen els residus d'una combinació de dos colorants sintètics d'ús alimentari, "Azul Brillante" i tartrazina produint diverses cortines de coloració verda, a més a més de presència de sals i matèria orgànica amb valors de DQO encara alts per considerar la reutilització de l'aigua en aquestes condicions. Amb les variables d'operació òptimes, es va aconseguir la màxima major eficiència utilitzant la membrana de 15 KDa, produint millors fluxos d'aigua, superant el temps d'operació i retardant la polarització o dipòsit de partícules en la seva superfície. Pel que fa a la qualitat de l'aigua filtrada, la DQO va disminuir considerablement en un 96%, es van eliminar els colorants en un 99% i es van eliminar les sals. Asssegurant amb aquests resultats, el bon funcionament de la membrana en un període de temps més llarg per recuperar aigua de reutilització.

**Paraules clau:** Recuperació d'aigua, Membranes, Optimització, Colorants

---

\*Autor para la correspondencia:  
escobar031976@hotmail.com

---

## INTRODUCCIÓN

La industria alimenticia consume cantidades considerables de agua para la elaboración de sus productos, generando volúmenes proporcionales de efluentes con alto contenido de materia orgánica, conductividad, turbidez y color entre otras características. Especialmente la industria de cereales utiliza como materia prima arroz, maíz, avena, trigo y cebada. La elaboración de cada cereal requiere diferentes aditivos, conservadores, sales, vitaminas y minerales, además de saborizantes y colorantes para producir atractivos alimentos, generando efluentes con volúmenes de carga de materia orgánica y otros residuos cada vez más difíciles de tratar.

La mayoría de los contaminantes de origen alimenticio, excepto el color, se reducen en plantas tratadoras. La mezcla de las especies que participan en la elaboración de los cereales dificulta sobre todo, la eliminación de sales y colorantes (Muro et al., 2009). Diferentes métodos físicos, como la floculación y los biológicos se han implementado con éxito para eliminar los colorantes insolubles (Allen y Koumanova, 2005; Forgacs et al., 2004; Seval et al., 2006). Sin embargo, los colorantes sintéticos de uso alimenticio son generalmente solubles en agua, lo que dificulta su separación con estos métodos. Por esta razón, es común encontrar alto contenido de coloración en los efluentes del sector alimenticio aún cuando han sido tratados en plantas tradicionales. La toxicidad que han mostrado algunos de estos colorantes en el agua (Gill, 2003), ha llevado a considerar esta situación como un problema grave y limitante en la captación del agua tratada con estas características en cuerpos receptores, o en su reuso para diferentes actividades propias de la industria.

Alternativas de tratamiento para remoción de colorantes se encuentran en diferentes investigaciones (Guoting et al., 2006; Calvo et al., 2007; Faria et al., 2005; Lee et al., 2006, Ofomaja y Ho 2007). Sin embargo, los procesos de filtración tangencial con membranas, se reportan como métodos avanzados de depuración en efluentes industriales para obtener agua fresca con posibilidades de reuso (De Florio et al., 2005; Chen et al., 2005; Allegre et al., 2006; Benítez et al., 2009). Altas eficiencias en la separación de los componentes de interés, se han obtenido por estos procesos. Especialmente, Mutlua (2002); Koyuncu (2003); Benítez et al., (2006), reportaron alrededor del 82 a 90 % en la remoción de color con membranas de microfiltración y ultrafiltración; aumentando la remoción al 96 % en nanofiltración, al tratar efluentes de una industria alimenticia en combinación con procesos biológicos. Con estos resultados, se aseguró su reuso en distintas aplicaciones. También desde años anteriores, en un sector industrial del norte de Taiwan se encuentran operando procesos con membranas para obtener agua potable a partir de sus efluentes (Chen et al., 2005). Estos resultados han mostrado la capacidad de recuperación de agua de consumo que los procesos de filtración con membranas pueden ofrecer.

La acertada selección de la membrana, ha proporcionado separaciones exitosas de los componentes que se desean remover, debido a que las membranas únicamente permiten el paso libre de aquellas partículas cuyo diámetro es menor a su tamaño medio de poro o por la selectividad que presenta la superficie de la membrana hacia las especies que deben ser filtradas. Esto significa que moléculas de colorantes solubles en agua y otras partículas de

mayor tamaño pueden ser retenidas por membranas hidrofílicas, permitiendo el paso libre del agua. El problema se presenta, cuando las características de la membrana no satisfacen los requerimientos en la filtración y las condiciones de operación son inadecuadas, encontrándose saturación temprana de especies colorantes en la superficie o poros de las membranas, afectando drásticamente el volumen de agua filtrada (Muro et al., 2009). Lo anterior, limita la productividad del proceso, eleva el costo en la recuperación de los productos que se pueden separar y afecta la vida útil de una membrana.

La velocidad de flujo de alimentación ( $V_f$ ), presión transmembrana ( $PTM$ ) y tiempo de operación ( $t$ ) son algunos de los factores más importantes que intervienen en el funcionamiento correcto del proceso de separación de los colorantes de efluentes industriales (Shukla y Cheryan 2002; Muro et al., 2009). Otras propiedades del material de la membrana, las características del flujo de alimentación y el tipo de transporte convectivo o difusivo de los componentes que atraviesan la capa de filtración, también influyen en el proceso y en la calidad que se puede obtener en el filtrado (Cheima et al, 2005).

En este sentido, diferentes trabajos se han desarrollado para determinar y controlar las condiciones favorables de operación en la decoloración de efluentes de la industria textil utilizando membranas (Marcucci et al., 2001; 2002; Ribeira et al., 2002; Gupta, 2004; Lopes et al., 2005; Cheima et al., 2005; Suen et al., 2007). Especialmente en Cabassud et al., (2001), después de identificar las variables del proceso, experimentos a nivel piloto fueron realizados para optimizar matemáticamente la velocidad de flujo tangencial y la  $PTM$  en la decoloración de aguas residuales. Los resultados encontrados hicieron posible implementar los procesos de membranas, en varias plantas de producción de agua potable; que a la fecha continúan operando a pesar de la variabilidad en la calidad de los efluentes. No obstante, a pesar de ser importante la optimización del proceso en el tratamiento de efluentes con membranas, la mayoría de las publicaciones relacionadas con el uso de membranas, están referidas a mejorar extracciones o concentraciones de algunos productos consumibles para recuperar y obtener proteínas de algunos alimentos. Las variables importantes en estos casos han sido condiciones de pH, temperatura, diferentes solventes, tiempo de extracción y fuerza iónica (Mizubuti et al., 2000; Hafidi et al., 2003; Sogui et al., 2003; García et al., 2006; Lipnizki, 2008; Badan et al., 2008; Wani et al., 2008). La optimización de la concentración de productos de interés en el área de Biotecnología utilizando diferentes condiciones de fermentación y temperatura en distintos módulos de membranas, también se encuentran reportados Lipnizki (2008). Todos estos autores coinciden en el análisis del efecto de las variables del proceso sobre la concentración de los flujos que se planean obtener.

En el caso del tratamiento de efluentes, tanto el flujo de agua filtrada, su calidad y la integridad de la membrana, se ven afectados por las condiciones de operación del proceso. La necesidad de optimizarlas para asegurar periodos largos de operación y obtención de agua para reuso, son aspectos que deben ser considerados cuando se requiere implementar un proceso a una escala mayor.

Siguiendo esta línea, el objetivo del presente trabajo, fue la optimización del proceso de recuperación de agua a partir de la remoción de los colorantes azul brillante en combinación con tartrazina de efluentes de una industria

de cereales. La (*PTM*) y (*t*) de operación fueron las variables consideradas para maximizar el flujo de agua filtrada en membranas de microfiltración y ultrafiltración con el propósito de establecer el mejor proceso de separación para solventar el consumo de agua en actividades de la misma industria.

## 2.1 Material

1000 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de aguas residuales de una industria de cereales fueron tratados diariamente mediante procesos biológicos en una planta piloto de experimentación, durante 6 meses. En el punto de descarga de la laguna de estabilización de lodos, 3 muestras de 2.5 litros agua se recolectaron en ese tiempo, para alimentar un módulo de filtración de nivel laboratorio cada 12 horas, en tres días diferentes por semana.

## 2.2. Características del efluente

Las características del efluente antes de ser suministrado al modulo de membranas, se presentan en el cuadro 1. Destaca la inherente coloración azul verde y aún restos de materia orgánica después del tratamiento biológico. El colorante sintético azul brillante FCF y la tartrazina (E102), fueron los principales cromóforos causantes de la coloración, produciendo varias cortinas de verde en el efluente (Muro et al., 2009).

## 2.3 Proceso de filtración con membranas

Por las características del efluente, membranas de microfiltración y ultrafiltración de material cerámico y tamaño laboratorio, fueron probadas en la recuperación del agua por remoción de los colorantes y otras especies. Considerando las propiedades de las membranas, las partículas a remover, y los resultados obtenidos en los estudios previos de filtración, se seleccionaron dos de ellas para comparar su eficiencia en el tratamiento: una de microfiltración y otra de ultrafiltración con umbral de corte de 150 KDa de 15 KDa respectivamente. Ambas membranas hidrofílicas de tipo tubular con capa fina de TiO<sub>2</sub>, longitud de 0.297 m; 0.006 m de diámetro interno y superficie de filtración de 5.65 X 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>. El efluente fue suministrado al módulo de la membrana a través de una bomba Heidolph Peristaltic modelo PD 5001. Diferentes pruebas de filtración se llevaron a cabo en las dos membranas, variando la potencia de la bomba para determinar la velocidad de alimentación *V<sub>f</sub>* en función de la *PTM*. Con la condición establecida de *V<sub>f</sub>*, las membranas se operaron con caudal continuo y constante por recirculación del flujo rechazado hacia el depósito de la alimentación, midiendo el volumen de agua filtrada cada 10 minutos con un rotámetro para calcular la densidad de permeado *J<sub>p</sub>* en Lh<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>, utilizando la ecuación (1).

$$J_p = \frac{V_p}{A} \quad (1)$$

Donde *V<sub>p</sub>* es el volumen de agua filtrada, *t* es el tiempo de operación del proceso y *A* es el área transversal de la circulación de flujo en la membrana.

**Cuadro 1.** Características del efluente proveniente de la laguna estabilizadora

Coloración	Conductividad (µScm-1)	pH	Turbidez (UNT)	Sólidos Totales (gL-1)	DQO (mg L-1)	Azul brillante (ppm)	Tartrazina (ppm)
Azul- verde	1715	7.4	102	1.04	487	4.08	1.15

## 2.4 Diseño experimental

Con el propósito de optimizar las variables *PTM* y *t* de operación para obtener el máximo flujo filtrado *J<sub>p</sub>*, se analizó el efecto de estas variables a una *V<sub>f</sub>* constante, mediante un diseño experimental factorial (2<sup>2</sup>) con dos factores, dos niveles para cada factor y con dos repeticiones para ambas membranas. A partir de este diseño, se incluyó un nivel cero en cada factor con cinco repeticiones para obtener un diseño central compuesto (DCC), con nueve experimentos representativos del comportamiento de la filtración en la primera aproximación al modelo de segundo orden característico de la máxima respuesta buscada. Los niveles establecidos en ambos factores, relacionaron la región de exploración de los procesos estudiados y a los puntos axiales (-α, +α) en el diseño experimental. En el cuadro II, se muestran los valores de los niveles indicados y la observación central (nivel cero) establecida para los factores. Los mismos niveles fueron utilizados en la optimización de ambas membranas.

**Cuadro II.** Datos de las variables en la región exploratoria

	Niveles		
	-α	0	+α
Variables de operación PTM (bar)	0.5	1	1.5
<i>t</i> (min)	20	25	30

En el cuadro III, se presenta el DCC con los niveles considerados en la región de exploración y los datos obtenidos de *J<sub>p</sub>* en esa región, para cada membrana. Los datos de la *PTM* y *t*, se codificaron en el intervalo (-1, 1) para facilitar los cálculos y el análisis de los resultados.

El efecto de la *PTM* y *t* sobre *J<sub>p</sub>* se analizó mediante el método estadístico de superficie de respuesta (*MSR*). El método de máxima pendiente en ascenso fue utilizado para recorrer secuencialmente la trayectoria dirigida hacia el valor máximo de *J<sub>p</sub>* a partir de los valores óptimos de las variables consideradas, pasando por la adecuación de un modelo de primer orden, con el propósito de conocer la proximidad al punto estacionario de la variable de respuesta. Para la construcción del modelo de segundo orden, se recolectaron datos del proceso cercanos al punto donde se presentó la curvatura del valor máximo buscado. Al diseño utilizado en la primera aproximación, se le agregaron otros niveles y sus repeticiones para obtener nuevamente un diseño DCC con un número específico de experimentos necesarios para ajustar el modelo de segundo orden. El modelo encontrado incluyó las dos variables codificadas, para facilitar su cálculo y su ajuste mediante mínimos cuadrados. La representación del modelo de segundo orden se presenta en la ecuación (2).

$$J_p = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2^2 + B_3X_2 + B_4X_2^2 + B_5X_1X_2 \quad (2)$$

**Cuadro III.** Datos del diseño experimental DCC 2<sup>2</sup> con un punto central y tres repeticiones

a) microfiltración					b) ultrafiltración				
Valores reales		Variables codificadas		Variable de respuesta	Valores reales		Variables codificadas		Variable de respuesta
PTM (bar)	t (min)	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	(Lh <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	PTM (bar)	t (min)	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	(Lh <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )
0.5	20	-1	-1	11.4	0.5	20	-1	-1	2.0
0.5	30	-1	1	11.1	0.5	30	-1	1	1.0
1.5	20	1	-1	16.7	1.5	20	1	-1	4.2
1.5	30	1	1	16.3	1.5	30	1	1	2.2
1	25	0	0	15.6	1	25	0	0	3.4
1	25	0	0	15.5	1	25	0	0	3.5
1	25	0	0	15.6	1	25	0	0	3.3
1	25	0	0	15.7	1	25	0	0	3.4
1	25	0	0	15.6	1	25	0	0	3.5

Donde  $B_0$  es valor del coeficiente que representa el valor fijo del punto central en el experimento mostrado en el cuadro III, los son los coeficientes lineales, cuadráticos y de intersección de las variables codificadas  $X_1$  y  $X_2$ .

### 2.5 Optimización del proceso de filtración del efluente en estudio

Con el ajuste del modelo de segundo orden, se obtuvieron los coeficientes  $B_n$  para determinar el valor máximo de la variable de respuesta  $J_p$  y las condiciones de operación óptimas que dieron lugar a ese valor. El software utilizado para realizar los cálculos correspondientes al proceso de optimización fue el Statgraphics.

### 2.6 Métodos analíticos

Las membranas se operaron con las condiciones óptimas determinadas, se filtró el efluente con cada membrana para determinar la calidad del agua obtenida. Las características de los flujos filtrados, fueron analizados bajo los siguientes parámetros y métodos correspondientes: pH y conductividad en un potenciómetro Cocutronic PC18; turbiedad en un microturbidímetro HFScientific; DQO, en un equipo HACH DR 2000; sólidos totales, conforme al Standard Methods; cuantificación de iones, en un analizador de flama digital modelo 2655 Cole-Pomer-Instrument Company y la absorbancia en un espectrofotómetro Lambda 25 UV/Vis Perkin Elmer.

Se Utilizaron soluciones preparadas en el laboratorio de azul brillante y tartrazina con diferentes concentraciones, se midió su absorbancia a una longitud de 630 y 426 nm de longitud de onda para cada colorante respectivamente. Con estos datos se construyó una curva de calibración, para evaluar la concentración de los colorantes en el agua filtrada.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Procesos de filtración con membranas

Se obtuvo la relación de  $J_p$  en función de la  $PTM$  para diferentes intervalos de  $V_f$ , los resultados se presentan en la figura 1. De la figura 1, se observa que la relación de  $J_p$  con la  $PTM$  se comporta de la misma forma, a medida que la  $PTM$  aumenta, también aumenta  $J_p$ , hasta que alcanza un límite. En microfiltración se aprecia que en el intervalo de 1.5 a 2.5 ms<sup>-1</sup>,  $v_f$  poca la diferencia en la obtención de  $J_p$ . Curvas de  $J_p$  por encima de este valor, proporcionaron mayores flujos hasta alcanzar el valor máximo. Con este

mismo intervalo de  $PTM$ , la membrana de ultrafiltración también dio como resultado, mayores valores de  $J_p$  con  $V_f = 3.0$  ms<sup>-1</sup>. Lo anterior significa que estas velocidades tienden a reducir la resistencia hidráulica a través de las membranas especificadas retrasando la polarización que tiene lugar en su superficie, lo que lleva a obtener mayores valores de  $J_p$  en un tiempo prolongado, favoreciendo así, al proceso de filtración.

### 3.2 Optimización del proceso de filtración del efluente

#### 3.2.1 Obtención del modelo de primer orden

En las expresiones (3) y (4) se visualiza el modelo de primer orden obtenido para la membrana de microfiltración y ultrafiltración, como primera aproximación para alcanzar el valor máximo de  $J_p$ . Los datos recopilados para la obtención de estos modelos, incluyeron el valor de las variables de la región de exploración determinados experimentalmente bajo la condiciones encontradas de  $V_f = 2.5$  y 3 ms<sup>-1</sup> en las membranas respectivas.

$$J_p = 2.94 + 0.85 X_1 - 0.75 X_2 \quad (3)$$

$$J_p = 14.8 + 2.62 X_1 - 0.18 X_2 \quad (4)$$

Como era esperado, estos modelos no resultaron ser los adecuados para ajustar la trayectoria del ascenso de la variable  $J_p$  debido a la suposición del efecto aditivo de las variables independientes  $PTM$  y  $t$  sobre la variable de respuesta  $J_p$ . Sin embargo, los modelos de primer orden fueron un referente para determinar la separación o cercanía al valor máximo del valor de  $J_p$  buscado.

En la figura 2, se muestra la trayectoria de máximo ascenso que siguió  $J_p$  considerando incrementos en las variables independientes.

La proximidad de la curvatura cerca del punto máximo observado en las figuras (a) y (b), aseguró la posibilidad de que en ambas membranas se alcanzara el valor límite superior de filtración del efluente, bajo condiciones óptimas.

#### 3.1.2 Obtención del modelo de segundo orden

El resultado del conjunto completo de los datos obtenidos para la segunda aproximación a la trayectoria de ascenso de  $J_p$  hasta la aproximación a la superficie óptima de esta variable, se presentan en el cuadro IV, en el que se muestra el diseño experimental obtenido, con un total de 14 experimentos debido al aumento nuevamente de un nivel cero

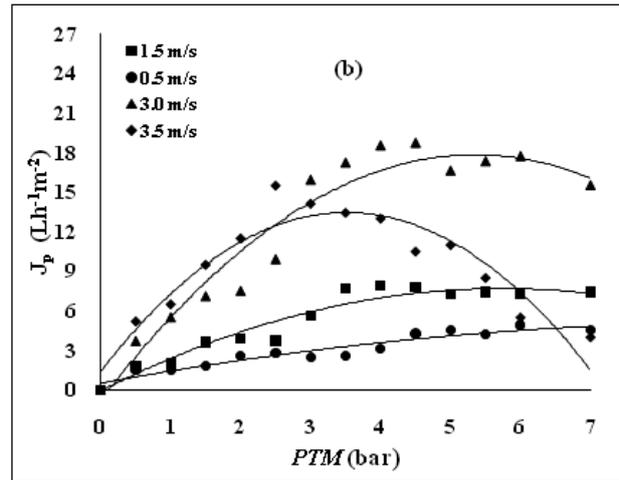
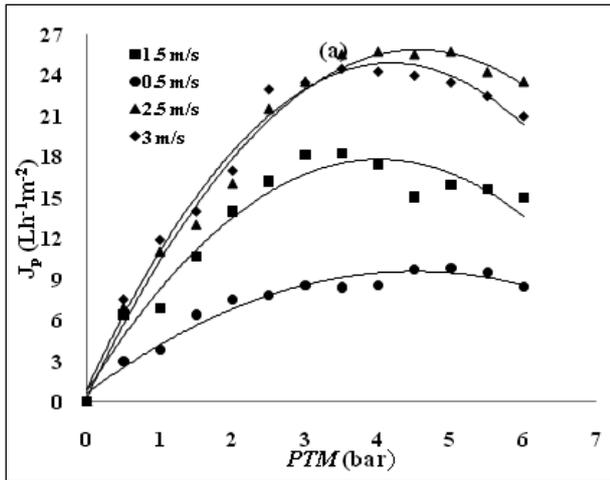


Figura 1. Relación de  $J_p$  en función de la PTM considerando distintas  $V_f$  para las membranas. (a) microfiltración y (b) ultrafiltración

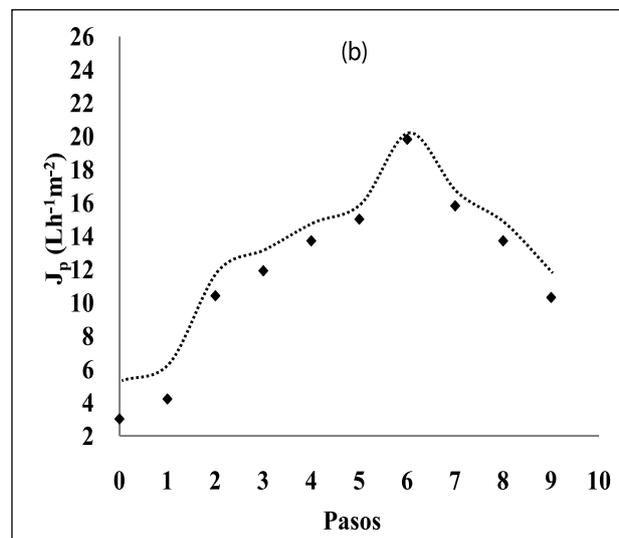
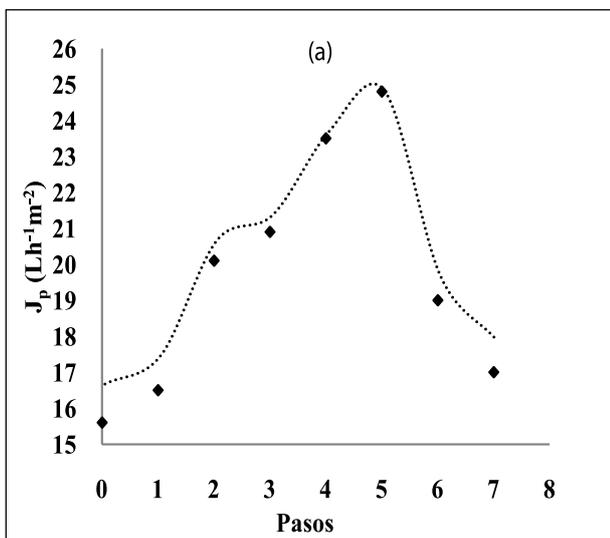


Figura 2. Trayectoria de máximo ascenso del flujo de filtración para las dos membranas. (a) microfiltración y (b) ultrafiltración

como punto central, con cinco repeticiones que fueron suficientes para ajustar el modelo de segundo orden.

En el cuadro IV, ya se aprecia que la variable de respuesta presenta un máximo en 3.5 y 30 min para microfiltración; 4 bar y 55 min, para ultrafiltración, por tanto se espera que las condiciones óptimas correspondan a esos valores aproximadamente. El ajuste de los datos anteriores dio como resultado los modelos de segundo orden obtenidos para cada membrana. Estos presentan en las ecuaciones (5) y (6).

$$J_p = 24.04 - 0.85 X_1 - 2.18 X_1^2 - 0.38 X_2 - 0.43 X_2^2 + 0.55 X_1 X_2 \quad (5)$$

$$J_p = 17.62 + 1.12 X_1 - 1.66 X_1^2 - 0.064 X_2 - 2.66 X_2^2 \quad (6)$$

Los valores de los coeficientes  $B_{ij}$ , de las variables codificadas  $X_1$  y  $X_2$  en los modelos anteriores, indicaron que el mayor efecto lineal y cuadrático para el proceso de microfiltración, se presenta en la variable codificada  $X_1$ , la cual corresponde a la condición PTM. Caso contrario sucede en la ultrafiltración, en donde el efecto cuadrático de la variable tiempo, afecta significativamente a  $J_p$  y

no existe efecto por interacción de las variables PTM y el tiempo.

### 3.1.3 Obtención del valor de las variables optimizadas

En el cuadro V, se presentan los valores óptimos obtenidos de las variables de operación y el máximo valor encontrado en el flujo de filtración de agua con esas condiciones, para las dos membranas estudiadas. En estos resultados se observa que para obtener el máximo flujo de agua filtrada, la PTM óptima debe ser 3.63 para microfiltración y 3.83 para ultrafiltración, por lo que ambas membranas filtran en forma continua aproximadamente en el mismo intervalo de PTM; sin embargo, el tiempo de operación  $t$ , en el que el flujo filtrado fue constante, resultó ser casi el doble con la membrana de ultrafiltración. En cuanto a la densidad de permeado  $J_p$ , en microfiltración se obtuvo mayor cantidad, pero sin que exceder considerablemente el valor obtenido con ultrafiltración. Lo anterior significa que el proceso de ultrafiltración, fue más eficiente para filtrar agua a partir del efluente en estudio, operando en forma continua durante aproximadamente una hora a una PTM de 3.83 bar y con  $V_f$  de 3 ms<sup>-1</sup>, sin presentarse colmatación en la superficie de la membrana en este intervalo de tiempo. Estos resultados también son útiles para auto-

**Cuadro IV.** Datos del diseño experimental DCC 2<sup>2</sup> con un punto central y cinco repeticiones

(a) microfiltración					(b) ultrafiltración				
Valores reales		Variables codificadas		Variable de respuesta	Valores reales		Variables codificadas		Variable de respuesta
<i>PTM</i> (bar)	<i>t</i> (min)	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>2</sub>	(Lh <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	<i>PTM</i> (bar)	<i>t</i> (min)	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>2</sub>	(Lh <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )
3	25	-1	-1	23.6	3.5	50	-1	-1	14.80
3	35	-1	1	21.9	3.5	60	-1	1	14.90
4	25	1	-1	18.9	4.5	50	1	-1	15.80
4	35	1	1	19.4	4.5	60	1	1	15.90
3.5	30	0	0	24.0	4	55	0	0	16.80
3.5	30	0	0	23.9	4	55	0	0	16.70
3.5	30	0	0	24.1	4	55	0	0	18.90
3.5	30	0	0	24.0	4	55	0	0	18.90
3.5	30	0	0	24.2	4	55	0	0	16.80
4.3	30	1.414	0	20.3	4.207	55	1.414	0	14.70
2.7	30	-1.414	0	20.0	2.793	55	-1.414	0	9.80
3.5	37.07	0	1.414	23.0	4.5	57.07	0	1.414	10.00
3.5	22.93	0	-1.414	24.30	4.5	42.93	0	-1.414	10.50

matizar el proceso bajo las condiciones encontradas. En una hora la filtración puede ser constante sin que exista disminución en el flujo de agua limpia, después de ese tiempo el proceso se puede detener unos minutos para la limpieza de la membrana y continuar con posteriores ciclos de operación.

**Cuadro V.** Valores optimizados en los procesos de filtración a  $V_f$  de 3ms<sup>-1</sup>

Tipo de Membranas	Valores optimizados		Variable de respuesta
	<i>PTM</i> (bar)	<i>t</i> (min)	<i>J<sub>p</sub></i> (Lh <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )
Microfiltración	3.64	33.06	23.81
Ultrafiltración	3.83	55.59	19.43

### 3.1.4 Localización de la región óptima del proceso

La figura 3, corresponden a la gráfica de superficie de respuesta  $J_p$  tridimensional, y la gráfica de contornos bidimensional respectivamente. Las gráficas se generaron a partir del modelo de segundo orden en función de la *PTM* y el tiempo *t* de filtrado para el proceso de ultrafiltración. En la figura 3, se visualiza el punto óptimo entre 3 y 4 bar y muy cercano a 60 minutos, lo cual coincide con los valores que fueron encontrados para la respuesta máxima de  $J_p$  en el diseño experimental y en el cálculo de las condiciones de operación. Es importante mencionar que en la gráfica de contorno se observa el efecto de forma independiente, de las dos variables consideradas en la optimización sobre la intensidad  $J_p$ .

### 3.2 Características de los flujos filtrados

La calidad del agua obtenida en la filtración de cada membrana fue favorecida por las condiciones de operación establecidas en la optimización. Los resultados se presentan en el cuadro VI, donde se aprecia la considerable

disminución en los parámetros establecidos, destacando la conductividad y la DQO. Con respecto a la remoción de los colorantes, los resultados en la filtración mostraron alta eficiencia, alcanzando una remoción de azul brillante y tartrazina alrededor del 99 % con la membrana de ultrafiltración. De acuerdo a la Norma Mexicana NOM-003-ECOL-1997. Las características del agua obtenida con ambas membranas son aceptables para plantear su reuso en actividades industriales. Los resultados anteriores fueron categóricos: el proceso de ultrafiltración con una membrana de 15 KDa, fue eficiente para tratar efluentes de una industria de cereales y recuperar agua de reuso.

## CONCLUSIONES

Resultados en el proceso de optimización de la filtración de efluentes de una industria de cereales utilizando membranas para la obtención de agua de reuso, indicaron que las membranas de 150 KDa y 15 KDa de microfiltración y ultrafiltración respectivamente, alcanzaron el máximo rendimiento en la recuperación de agua a una *PTM* entre 3 y 4 bar con una velocidad tangencial de 2.5 y 3 ms<sup>-1</sup> para cada una. Sin embargo, la membrana de 15 KDa superó en tiempo de operación a la membrana de 150 KDa, mostrando mayor eficiencia para superar las dificultades de polarización o depósito de partículas en su superficie, asegurando un buen funcionamiento para tratar el efluente en estudio. Dependiendo del destino del agua filtrada, las dos membranas proporcionaron agua limpia con calidad aceptable para reuso en actividades industriales, operando a las condiciones optimizadas. Destaca la membrana de ultrafiltración en la remoción de los colorantes sintéticos azul brillante y tartrazina de hasta un 99%, obteniéndose características en el agua filtrada semejantes al agua potable.

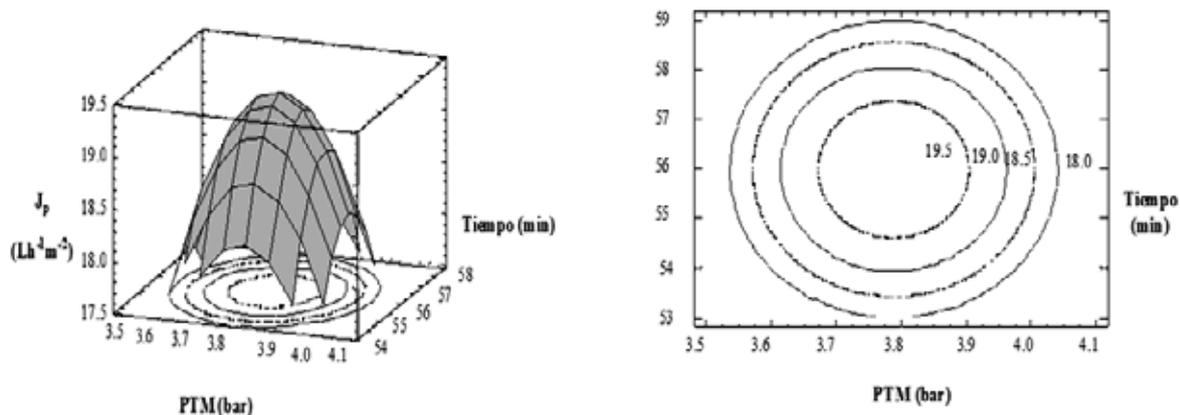


Figura 3. Gráfica tridimensional y de contorno de  $J_p$  en función de  $t$  y PTM 15 KDa. (a) tridimensional y (b) contorno

Cuadro VI. Características del agua filtrada

Tipo de Membranas	Parámetros						
	Conductividad ( $\mu\text{Scm}^{-1}$ )	pH	Turbidez (UNT)	Sólidos Totales ( $\text{gL}^{-1}$ )	DQO ( $\text{mg L}^{-1}$ )	Azul brillante (ppm)	Tartrazina (ppm)
Microfiltración	1489	7.5	1.84	0.80	32	0.23	0.09
Ultrafiltración	1225	7.5	0.75	0.38	8	0.10	0.02

## BIBLIOGRAFÍA

- Allegre C., Moulin P., Maiseau M. y Charbit F. (2006). Treatment and reuse of reactive dyeing effluents. *Journal of Membranes Science*. 269: 15-34.
- Allen S.J. y Koumanova B. (2005). Decolourisation of Water Wastewater Using Adsorption. *Journal of the University Chemical Technology and Metallurgy*. 40: 175-192.
- Badan A.P., Bei N., Lireny A., Gonçalves G., Cunha J. y Viotto A. (2008). The optimization of soybean oil degumming on a pilot plant scale using a ceramic membrane. *Journal of Food Engineering*. 87:514-521.
- Benítez F.J., Acero L.J. y Leal I.A. (2006). Application of microfiltration and ultrafiltration processes to cork processing wastewaters and assessment of the membrane fouling. *Separation and Purification Technology*. 50: 354-364.
- Benítez F.J., Acero L.J., Leal I.A. y González M. (2009). The use of ultrafiltration and nanofiltration membranes for the purification of cork processing wastewater. *Filtration and Separation*. 162: 1438-1445.
- Cabassud C., Anselme C., Bersillon J. y Aptel P. (2001). Ultrafiltration as a nonpolluting alternative to traditional clarification in water treatment. *Filtration and Separation*. 28: 194-198.
- Calvo L., Gilarran M.A., Casas J.A., Mohedano A.F. y Rodríguez, J.J. (2007). Detoxification of Kraft pulp ECF bleaching effluents by catalytic hydrotreatment. *Water Research*. 41: 915-923.
- Cheima F., Lassaad G. y Mahmoud D. (2005). Treatment of textile effluents by membrane technologies. *Desalination*. 185: 399-409.
- Chen H.H., Yehb H.H. y Shiauc S. (2005). The membrane application on the wastewater reclamation and reuse from the effluent of industrial WWTP in northern Taiwan. *Desalination*. 185: 227-233.
- De Florio L., Giordano A. y Mattioli D. (2005). Nanofiltration of low-contaminated textile rinsing effluents for on-site treatment and reuse. *Desalination*. 181: 283-292.
- Faria P.C., Órfaño J.J. y Pereira M.F. (2005). Mineralization of coloured aqueous solutions by ozonation in the presence of activated carbon. *Water Research*. 39: 1461-1470.
- Forgacs E., Cserhádi T. y Oros G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*. 30: 953-971.
- García A., Álvarez S., Riera F., Álvarez R. y Coca J. (2006). Sunflower oil miscella degumming with polyethersulfone membranes: effect of process conditions and MWCO on fluxes and rejections. *Journal of Food Engineering*. 74: 516-522.
- Gill M. (2003). Pigments of fungi (Macromycetes). *Natural Product Reports*. 20: 615-639.
- Guoting L., Jiuhui Q., Xiwang Z. y Jiantuan G. (2006). Electrochemically assisted photocatalytic degradation of Acid Orange 7 with  $\text{-PbO}_2$  electrodes modified by  $\text{TiO}_2$ . *Water Research*. 40: 213-220.
- Gupta S., Dey B., Hashim M. y Hasan B. (2004). Microfiltration of water-based paint effluents. *Advances in Environmental Research*. 8: 455-466.
- Hafidi A., Pioch D. y Ajana H. (2003). Adsorptive fouling of inorganic membranes during vegetable oils microfiltration. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 105: 138-148.
- Iaquinta M., Stoller M. y Merli C. (2009). Optimization of a nanofiltration membrane process for tomato industry wastewater effluent treatment. *Desalination*. 245: 314-320.

- 
19. Koyuncu I. (2003). An advanced treatment of high-strength opium alkaloid processing industry wastewaters with membrane technology: pretreatment, fouling and retention characteristics of membranes. *Desalination*. 155: 265-275.
  20. Lee J.W., Choi S.P., Thiruvengkatachari R., Shim W.G. y Moon H. (2006). Evaluation of the performance of adsorption and coagulation processes for the maximum removal of reactive dyes. *Dyes and Pigment*. 69: 196-203.
  21. Lipnizki J. (2008). Optimization of membrane processes in white biotechnology. *Desalination*. 224: 105-110.
  22. Lopes C., Petrus J. y Riella H. (2005). Color and COD retention by nanofiltration membranes. *Desalination*. 172: 77-83.
  23. Marcucci M., Nosenzo G., Capannellic G., Ciabatt I., Corrieri D. y Ciardelli G. (2001). Treatment and reuse of textile effluents based on new ultrafiltration and other membrane technologies. *Desalination*. 138: 75-82.
  24. Marcucci M., Nosenzo G., Matteucci A., Ranieri L. y Russo M. (2002). Experimental campaigns on textile wastewater for reuse by means of different membrane processes. *Desalination*. 149: 137-143.
  25. Mizubuti I.Y., Junior O.B., Souza L.W., Silva R.S. e Ida, E.L. (200). Response surface methodology for extraction optimization of pigeon pea protein. *Food Chemistry*. 70: 259-265.
  26. Muro C.R., Escobar J., Zavala R.E., Esparza M., Castellanos J., Gómez R.M. y García M. (2009). Evaluación del proceso de microfiltración en un efluente residual de una industria alimenticia para su reuso. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 25: 229-238.
  27. Mutlua S., Yetisb U., Gurkana T. y Yilmaza L. (2002). Decolorization of wastewater of a baker's yeast plant by membrane processes. *Water Research*. 36: 609-616.
  28. Ofomaja A.E. y Ho Y.S. (2006). Equilibrium sorption of anionic dye from aqueous solution by palm kernel fibre as sorbent. *Dyes and Pigments*. 74: 60-66.
  29. Rajasimman M. y Sangeetha R. (2009). Optimization of methane fermentation from effluent of bio-hydrogen fermentation process using response surface methodology. *Journal of Hazardous Material*. 168: 291-297.
  30. Ribeira R., Bergamasco R. y Gimenes M. (2002). Membranes synthesis study for colour removal of a textile effluent. *Desalination*. 145: 136-143.
  31. Seval K.A., Askin B., Gökhan E.Ü. y Taner Y. (2006). Colour and COD removal from textile effluent by coagulation and advanced oxidation processes. *Coloration Technology*. 122: 102-109.
  32. Shukla R. y Cheryan M. (2002). Performance of ultrafiltration membranes in ethanol-water solutions: effect of membrane conditioning. *Journal of Membranes Science*. 198: 75-85.
  33. Stoller M. y Chianese A. (2006). Optimization of membrane batch processes by means of the critical flux theory. *Desalination*. 191: 62-70.
  34. Suen S., Liu C., Shiou J., Chieh H. y Chu K. (2007). Removal of anionic reactive dyes from de water using anion exchange membranes as absorbers. *Water Research*. 41: 1491-1500.
  35. Wani A., Kaur D., (2008). Ahmed I. y Sogi D.S. (2008). Extraction optimization of watermelon seed protein using response surface methodology. *Food Science and Technology*. 41: 1514-1520.