

ESTUDIO DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN DE LA VINAZA RESIDUAL DE LAS DESTILERÍAS DE ALCOHOL ETÍLICO

Elaine Ojeda Armaignac, Romelia Hing Cortón
Facultad de Ingeniería Química, Universidad Oriente

El presente trabajo se realizó en la Universidad Tecnológica de Jamaica, como parte de una de las investigaciones que se realizan conjuntamente con la Facultad de Ingeniería Química, en búsqueda de soluciones que permitan de forma económica disminuir la corrosión de los equipos y materiales metálicos. El objetivo principal es el análisis de las variables que influyen en la obtención de sólidos a partir de la vinaza, para ser empleados como inhibidores ecológicos de corrosión.

La vinaza utilizada en este trabajo se obtiene como residual del proceso de destilación de alcohol a partir de las mieles finales de la caña de azúcar de la fábrica de ron de Kingston, Jamaica.

Fueron realizados ensayos experimentales para la obtención de sólidos por el método de electrocoagulación. El análisis de la influencia de las variables en el proceso de electrocoagulación, se desarrolló mediante un diseño de experimentos factorial 33, considerando como variables: la intensidad de corriente, el pH y el tiempo de residencia, obteniéndose las combinaciones óptimas de estas variables que permiten mayor cantidad de sólidos en las variables respuestas: la remoción de color y los sólidos totales.

Las tres variables estudiadas y sus interacciones tuvieron influencia en los sólidos totales obtenidos en la electrocoagulación, alcanzándose los mayores valores de cantidad de sólidos para los mayores valores de tiempo e intensidad de corriente y a un valor de pH intermedio, siendo la intensidad de corriente la variable de mayor significación. Para la remoción de color la intensidad de corriente no tuvo significación estadística, y la variable mas significativa fue el pH.

Palabras clave: electrocoagulación, vinaza, electrodos de aluminio, diseño factorial.

This work was carried out at the Technological University of Jamaica, as part of one of the research being conducted jointly with the Chemical Engineering faculty of Santiago de Cuba, in search of solutions to cost-effectively reduce corrosion of metal equipment and materials. The main objective is the analysis of the variables that influence the production of solids from the stillage, for use as organic corrosion inhibitors.

The vinasse used in this work is obtained as a residual from the distillation process of alcohol from the molasses sugar cane rum factory Kingston, Jamaica.

Experimental tests were conducted to obtain solid by the method of electrocoagulation. The analysis of the influence of the variables in the electrocoagulation process was developed by a 33 factorial design of experiments, considering variables such as current density, pH and residence time, obtaining the optimal combinations of these variables to higher solids in the response variables: the removal of color and total solids.

The three variables were studied and their interactions influence on the total solids obtained in the electrocoagulation, reaching the highest values of solids to the highest values of time and current intensity and an intermediate pH value, the current intensity remains the most significant variable. For the removal of color current intensity was not statistically significant, and the most significant variable was the pH.

Key words: electrocoagulation, vinasse, aluminum electrodes, factorial design.

Introducción

Uno de los métodos más utilizados para prevenir o atenuar la corrosión es el uso de inhibidores. Los inhibidores son sustancias que añadidas en

pequeñas cantidades al medio corrosivo disminuyen apreciablemente la velocidad de corrosión.

Algunos tipos de residuales contienen elementos que debido a sus propiedades inhibidoras pueden ser usados para combatir este problema

que afecta a nivel mundial. Un ejemplo lo constituye la industria alcoholera, que al verter sus efluentes (vinaza), trae consigo un alto poder contaminante en todos los ecosistemas donde es vertido.

La vinaza es un residual muy agresivo, entre las características más relevantes se destaca el pH ácido, alta carga orgánica DQO (50 000 – 100 000 mg/L), DBO (45 000 – 65 000 mg/L), color marrón, alta temperatura y la presencia de compuestos nitrogenados entre los que se destacan: proteínas, aminoácidos y vitaminas /14/.

Muchos han sido los procesos desarrollados para tratar este residual: tratamientos biológicos aerobios y anaerobios, combinados en algunos casos con ozono, evaporación, lagunas de oxidación, etcétera. En ninguno de estos tratamientos se logra degradar los compuestos coloreados que en este caso se deben fundamentalmente a las melanoidinas

La valorización de residuales industriales resulta una alternativa atractiva, que permite, al mismo tiempo, el tratamiento adecuado y el aprovechamiento de los mismos mediante un valor agregado.

Varios autores reportan en la literatura los tratamientos electroquímicos como procesos más adecuados para estos residuales, que a su vez permiten obtener un sólido más compacto /5, 6, 10-14/. La aplicación de estos procesos puede ser desarrollado por diferentes técnicas: electrooxidación, electrocoagulación y electrofloculación.

En este trabajo se desarrolla la electrocoagulación de la vinaza para la obtención de un sólido que se utiliza como inhibidor de la corrosión. La operación se lleva a cabo usando una variedad de ánodo y cátodo geométrico de aluminio, por los cuales fluye la corriente necesaria. Dentro de las variables que influyen en este proceso, en este trabajo se estudia la intensidad de corriente, pH y tiempo de electrólisis, con el objetivo de determinar las condiciones operacionales más eficientes para la separación de los sólidos presentes en el residual a través del método de electrocoagulación y se establece como objetivo específico:

- Analizar la influencia de las variables: pH, tiempo de electrólisis e intensidad de corriente, y sus combinaciones, que permita una mayor

cantidad de sólidos y mayor remoción de color, mediante la electrocoagulación, y a través de un diseño factorial 3³.

Materiales y métodos

El líquido a tratar en esta investigación es la vinaza residual, producto de la destilación alcohólica a partir de mieles finales de la caña de azúcar, que se lleva a cabo en la fábrica de ron de Kingston, Jamaica.

Para la obtención del sólido a partir de la vinaza se utilizó un electrocoagulador a escala de laboratorio el cual está compuesto por 2 electrodos planos de aluminio, dispuestos verticalmente, cuyas dimensiones totales son de 7,10 cm de largo, 3,85 cm de ancho, y 0,66 cm de espesor, espaciados 1,5 cm, y un área de 61,51 cm². Para energizar el sistema se utilizó una fuente de corriente directa, en la que se podía regular la corriente y el voltaje aplicado; mediante la conexión de un amperímetro y un voltímetro, en serie y paralelo respectivamente. Los electrodos fueron conectados en paralelo. La instalación eléctrica se muestra en la figura 1.

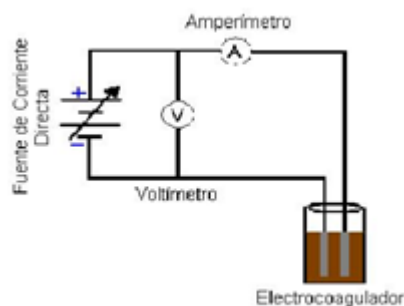


Fig. 1 Instalación eléctrica.

La valoración espectrofotométrica del color de las muestras se llevó a cabo mediante la determinación de la luminancia (%) según refiere el Standard Methods (1). Este método consiste en la medición del por ciento de transmitancia de la muestra para un conjunto de longitudes de onda específicas de 400-700 nm, utilizando agua destilada como blanco. La suma de los por cientos de transmitancia multiplicada por un factor (0,1) nos da el valor de luminancia (%), que es una medida de cuan clara es percibida la muestra por el ojo humano.

Las muestras con vinaza fueron electrocoaguladas y centrifugadas previamente, para la eliminación de los sólidos en suspensión y luego se diluyeron (1/10) de modo que su transmitancia para las 10 longitudes de onda para las cuales se mide, no sea menor al 10 %. Las longitudes de onda (nm) determinadas fueron: 489, 515, 529, 541, 551, 561, 572, 584, 600, 627.

La remoción de color se calculó mediante la ecuación:

$$A = 2 - \text{Log } 66,87 \quad (1)$$

$$\% R = \frac{A_i - A_f}{A_i} * 100 \quad (2)$$

donde:

L: Luminancia.

A_i : Absorbancia de la vinaza antes de la electrocoagulación, obtenida de los valores de luminancia.

A_f : Absorbancia de la vinaza después de la electrocoagulación, obtenida de los valores de luminancia.

%R: Por ciento de remoción de color

Con el objetivo de estudiar la influencia de las variables en el proceso de electrocoagulación, para obtener mayor cantidad de sólidos con propiedades inhibitorias, se desarrolló un diseño de experimentos factorial 3³. En los experimentos que se realizan en el proceso de electrocoagulación se consideraran las variables: intensidad de corriente, pH y el tiempo de residencia. Los niveles de las variables utilizadas en los experimentos se muestran en la tabla 1

Tabla 1
Niveles de las variables utilizadas en el experimento

| Variable independiente | Nivel inferior (-1) | Nivel central (0) | Nivel superior (+1) |
|--|---------------------|-------------------|---------------------|
| X_1 : Intensidad de la corriente (A) | 3 | 7 | 11 |
| X_2 : pH | 3 | 6 | 9 |
| X_3 : Tiempo de exposición (min) | 3 | 5 | 7 |

Resultados y discusiones

Análisis estadístico

Análisis de varianza para el sólido y la remoción de color

Una vez realizado el diseño, se procede a analizar los resultados de la cantidad de sólidos, y la remoción de color en el líquido residual, para la combinación de las variables experimentales, que aparecen en la tabla 2.

Tabla 2
Resultados obtenidos de los sólidos y la remoción de color
con las variables analizadas

| Intensidad de corriente (A) | pH | Tiempo de residencia (min) | Remoción de color (%) | Sólidos totales (g) |
|-----------------------------|----|----------------------------|-----------------------|---------------------|
| 7 | 6 | 5 | 70,07 | 6,917 2 |
| 11 | 3 | 3 | 78,24 | 5,598 2 |
| 11 | 9 | 5 | 62,58 | 14,056 2 |
| 7 | 6 | 3 | 70,89 | 6,272 9 |
| 3 | 6 | 7 | 71,2 | 5,490 5 |
| 3 | 3 | 3 | 80,22 | 3,800 3 |
| 11 | 3 | 7 | 79,64 | 15,416 3 |
| 3 | 9 | 7 | 68,92 | 4,864 2 |
| 11 | 6 | 3 | 70,93 | 8,026 3 |
| 11 | 9 | 3 | 69,08 | 8,393 7 |
| 11 | 6 | 5 | 66,34 | 16,25 |
| 7 | 3 | 5 | 80,72 | 5,388 1 |
| 7 | 3 | 3 | 82,21 | 6,074 4 |
| 3 | 6 | 5 | 73,39 | 5,029 4 |
| 7 | 6 | 7 | 73,46 | 8,510 4 |
| 7 | 3 | 7 | 76,89 | 6,801 2 |
| 11 | 3 | 5 | 79,71 | 8,091 5 |
| 3 | 9 | 3 | 64,95 | 4,554 9 |
| 11 | 9 | 7 | 69,78 | 15,142 5 |
| 3 | 9 | 5 | 69,02 | 4,618 |
| 3 | 3 | 5 | 80,81 | 4,197 |
| 7 | 9 | 3 | 66,32 | 6,410 8 |
| 3 | 6 | 3 | 69,21 | 4,084 6 |
| 3 | 3 | 7 | 80,09 | 4,797 3 |
| 11 | 6 | 7 | 75,14 | 14,828 2 |
| 7 | 9 | 5 | 67,92 | 7,648 2 |
| 7 | 9 | 7 | 70,54 | 8,721 7 |

Mediante el análisis de varianza, se determina la significación estadística de los factores y la prueba de calidad del ajuste del modelo. En las tablas 3 y 4 se muestra el análisis de varianza, considerando todos los factores y las interacciones de éstos para la cantidad de sólidos obtenidos y la remoción de color. El procesamiento de estos datos fue realizado a través del programa STATGRAPHICS PLUS 5,1. Como el intervalo de confianza escogido para este diseño es de un 95 % de probabilidad, todos los factores e interacciones que tengan un valor probable mayor que 0,05 no tienen significación estadística

En la tabla 3 se muestra el análisis de varianza, considerando todos los factores y las interacciones de éstos, para la cantidad de sólidos totales obtenidos de la electrocoagulación de la vinaza. Como el intervalo de confianza escogido para este diseño es de un 95% de probabilidad, todos los factores e interacciones que tengan un p-valor (valor probable) menor que 0,05 tienen significación estadística. Como se observa para esta variable respuesta todas las variables independientes y sus interacciones son significativas estadísticamente y se corrobora que estas variables son determinantes en el proceso de electrocoagulación.

Tabla 3
Análisis de la Varianza para los sólidos totales

| Fuente | Suma de cuadrados | Gl | Cuadrado medio | F-Ratio | P-Valor |
|-----------------|-------------------|----|----------------|-----------|---------|
| A: Intensidad | 451,941 | 1 | 451,941 | 12 706,46 | 0,000 0 |
| B: pH | 22,030 4 | 1 | 22,030 4 | 619,39 | 0,000 0 |
| C: tiempo | 112,42 | 1 | 112,42 | 3 160,73 | 0,000 0 |
| AA | 17,969 1 | 1 | 17,969 1 | 505,21 | 0,000 0 |
| AB | 8,048 22 | 1 | 8,048 22 | 226,28 | 0,000 0 |
| AC | 72,842 4 | 1 | 72,842 4 | 2 047,99 | 0,000 0 |
| BB | 9,709 5 | 1 | 9,709 5 | 272,99 | 0,000 0 |
| BC | 0,401 011 | 1 | 0,401 011 | 11,27 | 0,002 4 |
| CC | 0,933 237 | 1 | 0,933 237 | 26,24 | 0,000 0 |
| Falta de ajuste | 73,957 7 | 17 | 4,350 45 | 122,31 | 0,000 0 |
| Error puro | 0,960 33 | 27 | 0,035 567 8 | | |

En la figura 2 se presenta el diagrama de Pareto, que muestra los factores y las interacciones

que tienen mayor significación, corroborándose los resultados del análisis de varianza.

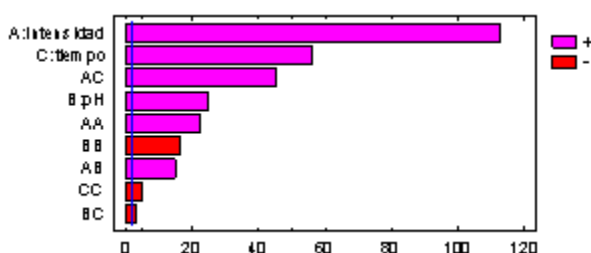


Fig. 2 Diagrama de Pareto para los sólidos totales obtenidos por electrocoagulación.

En la tabla 4 se muestra el análisis de varianza, considerando todos los factores y las interacciones de éstos, para la remoción de color del líquido residual de la electrocoagulación de la vinaza. Como el intervalo de confianza escogido para este diseño es de un 95 % de probabilidad, todos los factores e interacciones que tengan un p-valor (valor probable) menor que 0,05 tienen signifi-

cación estadística. Como se observa para esta variable respuesta la intensidad no resultó significativa estadísticamente, tampoco resultaron significativas las interacciones intensidad-intensidad e intensidad-tiempo, pero se mantuvieron dentro del modelo por ser éste un factor que influye teóricamente en la electrocoagulación y permite la interpretación fenomenológica del proceso.

Tabla 4
Análisis de la varianza para la remoción de color

| Fuente | Suma de cuadrados | Gl | Cuadrado medio | F-Ratio | P-Valor |
|-----------------|-------------------|----|----------------|----------|---------|
| A: Intensidad | 0,065 877 8 | 1 | 0,065 877 8 | 0,06 | 0,804 5 |
| B: pH | 1 264,28 | 1 | 1 264,28 | 1 199,26 | 0,000 0 |
| C: tiempo | 7,84 | 1 | 7,84 | 7,44 | 0,011 1 |
| AA | 1,258 85 | 1 | 1,258 85 | 1,19 | 0,284 2 |
| AB | 4,761 5 | 1 | 4,761 5 | 4,52 | 0,042 9 |
| AC | 2,178 04 | 1 | 2,178 04 | 2,07 | 0,162 1 |
| BB | 71,313 1 | 1 | 71,313 1 | 67,65 | 0,000 0 |
| BC | 17,001 7 | 1 | 17,001 7 | 16,13 | 0,000 4 |
| CC | 10,666 | 1 | 10,666 | 10,12 | 0,003 7 |
| Falta de ajuste | 162,412 | 17 | 9,553 68 | 9,06 | 0,000 0 |
| Error puro | 28,463 7 | 27 | 1,054 21 | | |

En la figura 3 se presenta el diagrama de Pareto, que muestra los factores y las interacciones

que tienen mayor significación, corroborándose los resultados del análisis de varianza.

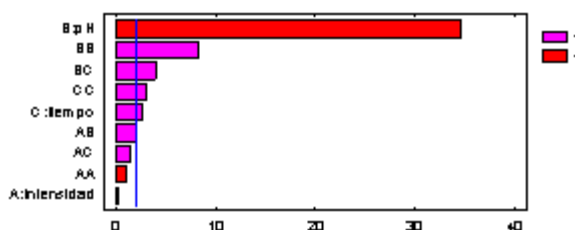


Fig. 3 Diagrama de Pareto estandarizado para la remoción de color.

Influencia de las variables en los sólidos totales obtenidos por la electrocoagulación de la vinaza

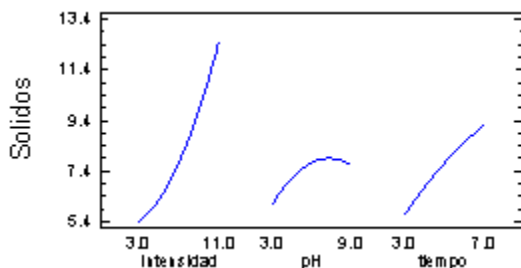


Fig. 4 Efectos principales observados en la obtención del sólido.

En la figura 4 se observan los efectos de cada una de las variables por separado.

Analizando la intensidad de corriente se observa que a mayor valor de ésta, mayor es la cantidad del sólido, debido a que:

1. permite la disolución de los ánodos que son los que aportan los cationes a la solución (que luego formarán los óxidos),
2. desestabiliza los coloides que se encuentran en la solución y
3. suministra la energía necesaria para que se lleven a cabo las reacciones de formación de los sólidos metálicos, que subirán a la superficie producto de los gases (H_2 y O_2) que ascienden como consecuencia de la hidrólisis del agua.

También se observa que la intensidad de corriente tiene gran influencia en el proceso, ya que con pequeños cambios aumenta grandemente la cantidad de sólidos que se obtiene. Un aumento de la intensidad de corriente conduce al incremento de la obtención de sólidos /11/.

Durante el proceso de electrocoagulación se obtiene un sólido en forma de espuma que asciende a la superficie y al mismo tiempo se obtiene un sólido que flocula y precipita. La cantidad de sólidos obtenidos en la espuma aumentan casi de forma lineal, según la Ley de Faraday. Estos resultados están muy vinculados a la intensidad de corriente, pues al incrementar los valores de ésta, los procesos en los electrodos aumentan proporcionalmente a la misma, acelerándose el proceso de desprendimiento de gases, lo cual favorece el ascenso de los sólidos en la espuma y dificulta el proceso de formación de los flóculos.

En los procesos que ocurren en los electrodos, los iones hidronio migran hacia el cátodo, ocurriendo la reacción de reducción de los mismos, desprendiéndose hidrógeno, lo cual provoca un intenso burbujeo a medida que aumenta la intensidad de corriente. Los iones hidroxilo presentes en la solución, migran al ánodo experimentando una reacción de oxidación desprendiendo oxígeno, esto incrementa el burbujeo y la mayor formación de espuma en el sistema /8-10/.

El análisis del tiempo de residencia indica que a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos.

La variable pH fue significativa estadísticamente aunque en menor proporción que la intensidad y el tiempo, pues el pH está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad (K_{ps}) la cual debe disminuir al elevarse el mismo, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene una mayor precipitación de los mismos en la medida que el pH aumenta. Sin embargo hay un valor de pH a partir del cual comienza a disminuir la cantidad de sólidos que se obtienen en la electrocoagulación.

Esto podría estar causado porque a pH mayores se favorece la polimerización de las melanoidinas y las proteínas presentes en este residual.

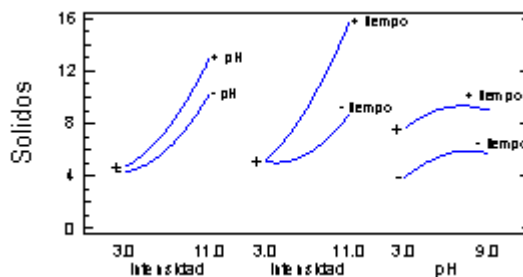


Fig. 5 Interacción de las diferentes variables para los sólidos totales.

Analizando la interacción entre las variables, como se muestra en el figura 5, se corrobora que la intensidad de corriente es la variable determinante. Para la interacción intensidad–pH al mínimo valor de intensidad se obtiene la menor cantidad de sólidos sin influencia del tiempo, y con el valor máximo de intensidad se obtiene mayor cantidad de sólidos, pero al mayor valor de pH los sólidos obtenidos son mayores que cuando se trabaja en el nivel inferior de pH.

El análisis de la interacción intensidad–tiempo demuestra que con el menor valor de intensidad se obtiene la menor cantidad de sólidos sin influencia ninguna del tiempo, al igual que la interacción anterior, y a la mayor intensidad se obtiene la mayor cantidad de sólidos, pero en este caso la influencia del tiempo es más significativa, ya que la combinación mayor tiempo y mayor intensidad arrojan las mayores cantidades de sólidos.

Para la interacción pH–tiempo se observa que al mayor nivel del tiempo se obtiene la mayor cantidad de sólidos, en cambio cuando se trabaja al menor nivel de tiempo los sólidos obtenidos son menores. Cuando se analiza el nivel de la variable pH se observa que independientemente del nivel a que se encuentre el tiempo, a medida que aumente el pH aumenta la cantidad de sólidos hasta un valor a partir del cual comienza a disminuir los sólidos obtenidos.

Influencia de las variables en la remoción de color

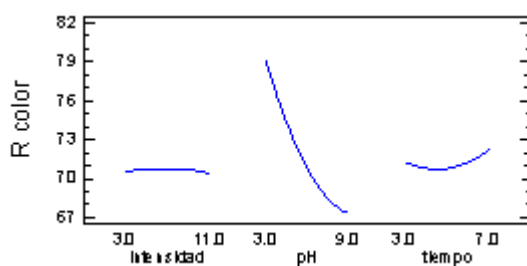


Fig. 6 Efectos principales observados en la remoción de color.

Como se observa, en las figuras /6 y 3/, el pH es la variable que tiene la mayor significación estadística en la remoción de color del líquido residual de la vinaza tratada por electrocoagulación, y el tiempo también es significativo pero en menor medida, para el rango escogido en el análisis de estas variables. La significación del pH se corresponde con estudios realizados anteriormente /3-8/.

En la vinaza los compuestos responsables del color son las melanoidinas y los caramelos. Las melanoidinas pueden representar el 70-80 % del peso de las sustancias coloreadas de la miel /4/. Son polímeros de alto peso molecular (mayores de 10 kDa) formados al reaccionar en condiciones alcalinas, azúcares y aminoácidos (reacción de Maillard), o de manera más general, por la reacción entre los grupos amino y carboxilo de las sustancias orgánicas /12/. Las melanoidinas tienen propiedades antioxidantes y frecuentemente son tóxicas para los microorganismos utilizados en el biotratamiento de efluentes /7/. No existe una estructura química que las identifique, pero se les asocia con el humus por sus características espectroscópicas y composición /2/.

En cuanto a los caramelos, estos se producen debido a la descomposición térmica y condensación de azúcares /9/.

Lo resultados revelan que mientras mas bajo es el pH de la vinaza se alcanza la máxima remoción de color. El ajuste de la vinaza a pH superiores al original incrementa el color de la misma, provocando un descenso significativo de

la luminancia. Esto podría estar causado porque a pH mayores se favorece la polimerización de los productos que han quedado de las reacciones de caramelización (reacciones que ocurren en las mieles que dan origen a la vinaza), reduciendo el paso de la luz y por tanto, la reducción de los porcentajes de luminancia y de remoción de color. Se conoce que a pH alcalino se favorece la formación de las melanoidinas. Por tanto, no es necesaria la adición de sustancias químicas para cambiar el valor del pH original de la vinaza para ser tratado con electrodos de aluminio.

El tiempo es significativo en menor medida, y la intensidad de corriente no es significativa para el rango escogido de esta variable. Corroborándose que para la remoción de color la variable más significativa es el pH.

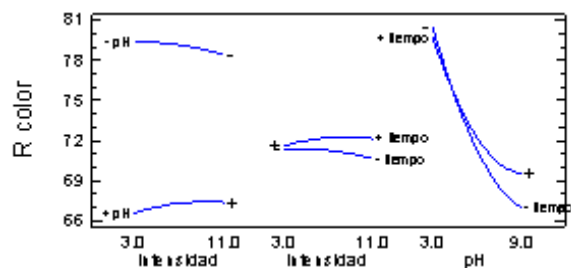


Fig. 7 Interacción de las diferentes variables para la remoción de color.

Analizando la interacción intensidad – pH se observa claramente que al menor nivel de pH se obtiene la mayor remoción de color, independientemente del nivel en que se trabaje la intensidad de corriente. En cambio para la interacción intensidad– tiempo se observa la no influencia del nivel en que se trabajen ambas variables, corroborándose los resultados del diagrama de Pareto (figura 3) donde se refleja que esta interacción no es estadísticamente significativa.

La interacción pH– tiempo resultó la mas significativa, resultando que al menor nivel del pH se obtiene la mayor remoción de color independiente del nivel en que se encuentre el tiempo, y al mayor nivel de pH y mayor tiempo se obtiene la mayor remoción de color.

Conclusiones

- 1- Se comprobó que para los sólidos totales obtenidos en el proceso de electrocoagulación de la vinaza, las tres variables estudiadas fueron significativas estadísticamente en el siguiente orden de prioridad: intensidad de corriente, tiempo y pH; obteniéndose la mayor cantidad de sólidos para la mayor intensidad de corriente y el mayor tiempo, mientras que para el pH existe un punto de inflexión a pH 6.
- 2- Se determinó que todas las interacciones de las variables estudiadas para los sólidos totales fueron significativas, siendo la de mayor relevancia la de intensidad-tiempo, obteniéndose la mayor cantidad de sólidos para el mayor valor de intensidad y tiempo, continuándole en orden de prioridad la interacción intensidad-pH y pH-tiempo.
- 3- Para la remoción de color se determinó que el pH fue la variable más significativa y en menor medida el tiempo, obteniéndose la mayor remoción de color para el menor valor de pH. La intensidad de corriente no resultó significativa estadísticamente.
- 4- En la remoción de color se determinó que la interacción más significativa resultó el pH-tiempo, obteniéndose la mayor remoción de color para el menor pH independientemente del nivel en que se encuentre el tiempo estudiado. En menor medida fue significativa la interacción intensidad-pH, y la interacción intensidad-tiempo no resultó significativa estadísticamente.

Recomendaciones

- 1- Realizar una optimización económica del proceso de electrocoagulación de la vinaza, a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, que permita determinar los mejores valores técnico-económicos de las variables estudiadas.
- 2- A partir de los resultados que se obtengan de la recomendación anterior, realizar un diseño de experimento que permita determinar las condiciones óptimas de las variables del proceso de electrocoagulación de la vinaza para la obtención de una mayor cantidad de sólidos.
- 3- Caracterizar los sólidos obtenidos en las mejores condiciones experimentales, para determinar los mecanismos mediante los cuales se llevan a cabo la obtención de los sólidos en la electrocoagulación de la vinaza y su mecanismo como inhibidores de la corrosión.

Bibliografía

- 1- APHA. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 20th Edition, Washington D.C, USA: 1124. 1998.
- 2- Blondeau R. Biodegradation of natural and synthetic humic acids by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 55: 1282-1285. 1989.
- 3- Clavel Baldaquín, Lázaro. "Electrocoagulación y floculación de la vinaza". Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Química. 2008.
- 4- ICIDCA. La industria de los derivados de la caña de azúcar. Editorial Científico- Técnica (eds). Ciudad de la Habana, Cuba: 147-158. 1986.
- 5- Kannan N., Karthikeyan G., Tamilselvan N., Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated Areca catechu met carbon. *Journal of Hazardous Materials B137* (2006) 1803-1809.
- 6- Kirzhner F., Zimmels Y., Shraiber Y., Combined treatment of highly contaminated winery wastewater. *Separation and Purification Technology* 63(2008) 38-44.
- 7- Kitts D., Wu C.H., Stich H., Powrie W. Effects of glucose-glycine Maillard reaction products on bacterial and mammalian cell mutagenesis. *J. Agric. Food Chem.*, 41:2353-2358. 1993.
- 8- Krishna Prasad R., Srivastava S.N., Electrochemical degradation of distillery spent wash using catalytic anode: Factorial design of experiments. *Chemical Engineering Journal* 146 (2009) 22-29
- 9- Kort MJ. Colour in the Sugar Industry. *Science and Technology*. Birch GG y Parker KJ. (eds.) Applied Science, London: 97. 1979.
- 10- Linares - Hernandez I. A combined electrocoagulation - sorption process applied to mixed industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 144(2007) 240-248.
- 11- Ojeda Armaignac E., Hing Cortón R. Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de aluminio. Vol. XXX, No2, 2010.
- 12- Reynolds TM. Chemistry of nonenzymic browning. I. The reaction between aldoses and amines. *Advan. Food Res.*, 12: 1-52. 1968.

-
- 13-Rodríguez Pérez S. Decoloración de los residuales de la pasteurización de la pulpa de café y la vinaza por *Pleurotas* sp. Tesis de doctorado, 2006.
- 14-Yusuf Yavuz, EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater. *Separation and Purification Technology* 53(2007) 135-140.
- 15-Zaroual Z, M Azzi, N Saib, Chainet "Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent". *Journal of Hazardous materials B* 131, 2006.